

## Travail de fin d'études

**Auteur :** Parmentier, Laurine

**Promoteur(s) :** Hubert, Aurelia

**Faculté :** Faculté des Sciences

**Diplôme :** Master de spécialisation en gestion des risques et des catastrophes

**Année académique :** 2021-2022

**URI/URL :** <http://hdl.handle.net/2268.2/16401>

---

### *Avertissement à l'attention des usagers :*

*Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.*

*Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.*

---



ULiège – Faculté des Sciences – Département Sciences et Gestion de  
l’Environnement

UCLouvain – Faculté des bio-ingénieurs

**Amélioration de la chronostratigraphie du Mont Fuji (Japon)  
pour les périodes Subashiri-c (1500 à 300 cal BC) et Subashiri-d  
(300 cal BC à aujourd’hui) à l’aide du logiciel OxCal**



**Par Laurine PARMENTIER**

Mémoire rédigé en vue de l’obtention du diplôme de Master de Spécialisation en  
Gestion des Risques et Catastrophes

**Année académique 2021-2022**

Rédigé sous la direction de la promotrice : Prof. Aurélia HUBERT-FERRARI



Comité de lecture : Aurélia Hubert-Ferrari, Pierre Ozer, Benoît Smets

### **Copyright**

Toute reproduction du présent document, par quelque procédé que ce soit, ne peut être réalisée qu'avec l'autorisation de l'auteur et de l'autorité académique\* de l'Université de Liège.

\*L'autorité académique est représentée par le(s) promoteur(s) membre(s) du personnel enseignant de l'Université de Liège.

Le présent document n'engage que son auteur.

Auteur du présent document : Laurine Parmentier (laurineparmentier@hotmail.com)

### **Copyright:**

Any reproduction of this document, by any means whatsoever, may only be made with the permission of the author and the academic authority\* of the University of Liège.

\*The academic authority is represented by the promoter(s) member(s) of the teaching staff of the University of Liège.

This document is the sole responsibility of its author.

Author of this document: Laurine Parmentier (laurineparmentier@hotmail.com)



## 1 REMERCIEMENTS

Le cheminement entrepris pour l'écriture de ce mémoire a été tortueux, c'est pourquoi je voudrais exprimer ma gratitude envers toutes les personnes qui m'ont défiée, qui m'ont soutenue et qui sont restées avec moi jusqu'au bout du chemin. Je tiens à remercier tous ceux qui ont contribué, directement ou indirectement, à la rédaction de ce travail.

Tout d'abord, je souhaiterais remercier la Professeure Aurélia Hubert-Ferrari (ULiège), la promotrice principale de ce mémoire, pour sa disponibilité, le temps qu'elle m'a accordé et l'aide précieuse qu'elle m'a apportée. Tout au long de la réalisation de mon mémoire, elle m'a laissé une autonomie tout en m'aiguillant sur des pistes de réflexions riches qui ont alimenté ma réflexion. Sans son accompagnement et sa bienveillance, la réalisation de ce mémoire n'aurait pas été possible.

Je remercie le Professeur Alain Demoulin, le Professeur Pierre Ozer, coordinateur du Master de Spécialisation en Gestion des Risques et Catastrophes, et les autres membres de l'équipe académique de l'Université de Liège, qui ont mis à ma disposition des cours et différents outils pour me permettre de mieux appréhender la problématique traitée dans ce mémoire.

Je tiens également à remercier mes camarades de classes du Master de spécialisation en Gestion des Risques et Catastrophes pour le soutien apporté et les échanges spontanés lors de la réalisation des différents travaux de l'année.

Je souhaite remercier particulièrement mes amis et anciens condisciples du Master en Sciences et Gestion de l'Environnement, Audrey, Valentin, Kelly et Florent, pour leurs bonnes idées, leur amitié et leur soutien inconditionnel.

Enfin, je remercie mes parents, mes amis et Fripouille le chat. Ils m'ont également apporté un soutien sans faille lors de mes années d'études et plus spécifiquement lors de la rédaction de ce mémoire.



## 2 RÉSUMÉ / ABSTRACT

Le présent travail vise à améliorer la chronostratigraphie du Mont Fuji pour les périodes Subashiri-b et Subashiri-c à partir de données collectées dans de multiples études et compilées dans le travail de Takada *et al.* (2016). Le logiciel OxCal rend possible cette amélioration en utilisant les datations au carbone 14 pour créer un modèle statistique des dépôts en exploitant la méthode MCMC. La méthodologie utilisée pour construire le code à entrer dans le logiciel s'est basée sur d'autres études ayant des objectifs similaires (DuRoss, Personius, Crone, Olig, & Lund, 2011) (Reuther, Potter, Coffman, Smith, & Bigelow, 2020) (Tani, et al., 2013) ainsi que sur les informations à disposition dans la base de données, qui permettent ou pas d'utiliser certaines commandes du logiciel (Takada, Yamamoto, Ishizuka, & Nakano, 2016). Finalement, ce sont 45 éruptions qui ont été modélisées pendant les périodes étudiées entre -2284 BC et 1708 AD en incluant 4 éruptions historiques. Les résultats obtenus laissent la porte ouverte à de futures améliorations comme le calcul de la récurrence ainsi qu'à une implication dans d'autres études et dans le plan japonais de gestion de crises.

**Mots-clés :** Mont Fuji, volcan, chronostratigraphie, OxCal.

This thesis aims to improve the chronostratigraphy of Mount Fuji for the Subashiri-b and Subashiri-c periods based on data collected in multiple studies and compiled in the work of Takada *et al.* (2016). The OxCal software makes this improvement possible by using carbon-14 dating to create a statistical model of the deposits by exploiting the MCMC method. The methodology used to build the code to be entered into the software was based on other studies with similar objectives (DuRoss, Personius, Crone, Olig, & Lund, 2011) (Reuther, Potter, Coffman, Smith, & Bigelow, 2020) (Tani, et al., 2013) as well as the information available in the database, which may or may not allow the use of certain software commands (Takada, Yamamoto, Ishizuka, & Nakano, 2016). Ultimately, 45 eruptions were modeled during the periods studied between -2284 BC and 1708 AD including 4 historical eruptions. The results obtained leave the door open for future improvements such as the recurrence calculation as well as for involvement in other studies including the Japanese crisis management plan.

**Key words:** Mount Fuji, volcano, chronostratigraphy, OxCal, MCMC.



### 3 TABLE DES MATIERES

1	Remerciements.....	ii
2	Résumé / Abstract.....	iii
3	Table des matières.....	iv
4	Table des illustrations.....	vi
4.1	Figures.....	vi
4.2	Tableaux.....	viii
5	Abréviations.....	xi
6	Introduction.....	12
7	Question de recherche.....	14
7.1	Présentation du logiciel utilisé et de son fonctionnement.....	14
7.2	Autres études utilisant la même approche avec OxCal.....	16
8	Contexte.....	18
8.1	Localisation et géodynamisme.....	18
8.2	Eruptions historiques et historique d'activité.....	21
8.2.1	Eruptions historiques.....	21
8.2.2	Historique d'activité.....	22
8.3	Caractéristiques géologiques.....	25
8.4	Risque et aléa volcanique.....	28
8.4.1	Définition de l'aléa volcanique.....	28
8.4.2	Conséquences.....	28
8.4.3	Monitoring.....	31
9	Matériel et méthode.....	32
9.1	Base de données.....	32
9.2	Logiciel.....	32
9.3	Choix de période.....	33
9.4	Méthodologie générale pour la construction du code.....	33
9.4.1	Elimination des valeurs aberrantes.....	34
9.4.2	Ordre stratigraphique.....	37
9.4.3	Types de date.....	37
9.4.4	Eléments du code et choix des commandes.....	38
10	Résultats et discussion.....	40
10.1	Résultats du modèle complet.....	40
10.2	Récapitulatif des résultats obtenus pour les éruptions.....	56
10.3	Perspectives futures.....	61



11	Conclusion.....	64
12	Bibliographie.....	66
13	Annexes .....	70
13.1	Annexe I : Base de données .....	70
13.2	Annexe II : Code pour le modèle allant de 700 à 1000 AD.....	83
13.3	Annexe III : Code pour le modèle complet allant de la période Subashiri-b à aujourd'hui	86
13.4	Annexe IV : Résultats obtenus avec le code du modèle allant de 700 à 1000 AD	93



## 4 TABLE DES ILLUSTRATIONS

### 4.1 FIGURES

- Figure 1 : Carte de la géographie du Japon. Le Mont Fuji est ici représenté par un triangle noir ([www.lonelyplanet.fr](http://www.lonelyplanet.fr))..... 18
- Figure 2 : Carte représentant les trois plaques tectoniques influençant le volcanisme du Mont Fuji, notamment via un phénomène de subduction. EU représente la plaque eurasiennne, PH représente la plaque de la mer des Philippines et NA représente la plaque nord-américaine. Il y a une subduction de PH sous EU au niveau de la ligne dentée séparant les deux plaques (Hosono, Mitsui, Ishibashi, & Jun, 2016). ..... 19
- Figure 3 : (a) Carte de la morphologie de l'archipel japonais avec les volcans quaternaires actifs représentés par des triangles rouges. Le Mont Fuji se trouve sur la chaîne de montagnes IBR. Cela influence l'activité du volcan, notamment à cause de la subduction de la plaque nord-américaine (b) Carte des iso-profondeurs représentées par les lignes non continues (intervalle de 50 km) pour la plaque nord-américaine, par les lignes bleues (intervalle de 10 km) pour la plaque de la Mer des Philippines (Nakajima & Hasegawa, 2007)..... 20
- Figure 4: La carte (a) représente le contexte tectonique de la zone autour du Mont Fuji. Celui-ci se trouve à proximité de failles et de plaques tectoniques. La carte (b) présente le relief ainsi qu'une vue en perspective de la zone autour du Mont Fuji. La carte (c) montre un profil topographique de la FKFZ passant à l'ouest du Mont Fuji (Aiming, Kenta, & Hideto, 2013). ..... 21
- Figure 5 : Carte géologique simplifiée du Mont Fuji montrant les produits éruptifs correspondant à chaque période volcanique. Cela reflète les périodes avec plus ou moins d'activité. La carte d'index dans le fond à droite représente la localisation du Mont Fuji par rapport à l'archipel japonais. Les triangles rouges représentent les volcans quaternaires ; ER = Eurasia Plate, PC = Pacific or North-American Plate et PS = Philippine Sea Plate. (Yamamoto, Nakano, & Ishizuka, 2021). ..... 25
- Figure 6 : Diagramme de variation de composition des produits éruptifs du Mont Fuji pendant les périodes Subashiri-b, Subashiri-c et Subashiri-d). Les éruptions sont principalement basaltiques (Yamamoto, Nakano, & Ishizuka, 2021). ..... 26
- Figure 7 : Variations temporelles de la géochimie des produits éruptifs du Mont Fuji depuis la période Subashiri-b (Yamamoto, Nakano, & Ishizuka, 2021). Ce graphique montre également que les intervalles entre les événements volcaniques ne sont pas égaux..... 27
- Figure 8 : Volumes cumulés de magma éruptif (et ratio pyroclastique) pour les périodes Subashiri-b, -c et -d (Yamamoto, Nakano, & Ishizuka, 2021). Les éruptions historiques de Jogan et Hoei sont renseignées. Ce graphique montre que les volumes éjectés par le volcan varient d'une éruption à l'autre pendant les périodes représentées..... 28
- Figure 9 : Carte des isopaques du tephra éjecté lors de l'éruption Hoei en 1707 AD. A cause des vents dominants, les villes situées à l'est du Mont Fuji sont plus impactées par les éjectas volcaniques. (a) Localisation du Mont Fuji par rapport au Japon. (b) Isopaques de l'entièreté du tephra rejeté lors de l'éruption. (c) Isopaque plus local. (Miyaji, Kan'no, Kanamaru, & Mannen, 2011)..... 29
- Figure 10: Exemple de donnée aberrante éliminée avec l'expertise de l'autrice. L'échantillon lié à la date entourée en rouge a été retiré et n'a pas été entré dans le code du modèle car il est environ 2000 ans plus âgé que les échantillons qui l'entourent..... 35



Figure 11 : Exemple de message d'erreur permettant de détecter une éventuelle aberrance. Dans ce cas-ci, un des échantillons datés dans la phase liée à la coulée Sd-Yak semble poser problème au logiciel car l'indice A est inférieur à 60%.....	35
Figure 12 : Multiple plot sorti d'OxCal pour le modèle complet. Ce graphique reprend tous les échantillons entrés dans OxCal pour créer le modèle statistique ainsi que les dates d'éruption calculées. Les échantillons sont associés avec leur densité de probabilité avant et après modélisation (partie 1). .....	46
Figure 13 : Multiple plot sorti d'OxCal pour le modèle complet. Ce graphique reprend tous les échantillons entrés dans OxCal pour créer le modèle statistique ainsi que les dates d'éruption calculées. Les échantillons sont associés avec leur densité de probabilité avant et après modélisation (partie 2). .....	47
Figure 14 : Multiple plot sorti d'OxCal pour le modèle complet. Ce graphique reprend tous les échantillons entrés dans OxCal pour créer le modèle statistique ainsi que les dates d'éruption calculées. Les échantillons sont associés avec leur densité de probabilité avant et après modélisation (partie 3). .....	48
Figure 15 : Multiple plot sorti d'OxCal pour le modèle complet. Ce graphique reprend tous les échantillons entrés dans OxCal pour créer le modèle statistique ainsi que les dates d'éruption calculées. Les échantillons sont associés avec leur densité de probabilité avant et après modélisation (partie 4). .....	49
Figure 16 : Multiple plot sorti d'OxCal pour le modèle complet. Ce graphique reprend tous les échantillons entrés dans OxCal pour créer le modèle statistique ainsi que les dates d'éruption calculées. Les échantillons sont associés avec leur densité de probabilité avant et après modélisation (partie 5). .....	50
Figure 17 : Multiple plot sorti d'OxCal pour le modèle complet. Ce graphique reprend tous les échantillons entrés dans OxCal pour créer le modèle statistique ainsi que les dates d'éruption calculées. Les échantillons sont associés avec leur densité de probabilité avant et après modélisation (partie 6). .....	51
Figure 18 : Multiple plot sorti d'OxCal pour le modèle complet. Ce graphique reprend tous les échantillons entrés dans OxCal pour créer le modèle statistique ainsi que les dates d'éruption calculées. Les échantillons sont associés avec leur densité de probabilité avant et après modélisation (partie 7). .....	52
Figure 19 : Multiple plot sorti d'OxCal pour le modèle complet. Ce graphique reprend tous les échantillons entrés dans OxCal pour créer le modèle statistique ainsi que les dates d'éruption calculées. Les échantillons sont associés avec leur densité de probabilité avant et après modélisation (partie 8). .....	53
Figure 20 : Single Curve sorti d'OxCal (courbe de calibration IntCal20). Ce graphique ne comprend pas toutes les éruptions pour une question de visibilité. Il comprend une date calibrée par éruption, car il n'y a que les échantillons calibrés qui peuvent être repris sur ce type de graphique. ....	55
Figure 21 : Single Curve sorti d'OxCal (courbe de calibration IntCal20). Ce graphique comprend une date calibrée par éruption. Zoom sur des éruptions pour lesquelles la calibration a fortement réduit l'intervalle de datation. ....	55
Figure 22 : Single Curve sorti d'OxCal (courbe de calibration IntCal20). Ce graphique comprend uniquement les échantillons calibrés de l'éruption Sd-Syt. ....	56
Figure 23 : Multiple plot sorti d'OxCal pour le modèle complet reprenant seulement les éruptions calculées par le modèle. Chacune d'entre elles est associée à un intervalle d'âge (partie 1). .....	59



Figure 24 : Multiple plot sorti d'OxCal pour le modèle complet reprenant seulement les éruptions calculées par le modèle. Chacune d'entre elles est associée à un intervalle d'âge (partie 2). .....	60
Figure 25 : Multiple plot sorti d'OxCal pour le modèle complet reprenant seulement les éruptions calculées par le modèle. Chacune d'entre elles est associée à un intervalle d'âge (partie 3). .....	61
Figure 26: Multiple plot sorti d'OxCal pour le modèle 700-1000 AD. Ce graphique reprend tous les échantillons entrés dans OxCal pour créer le modèle statistique ainsi que les dates d'éruption calculées. Les échantillons sont associés avec leur densité de probabilité avant et après modélisation (partie 1). .....	95
Figure 27: Multiple plot sorti d'OxCal pour le modèle 700-1000 AD. Ce graphique reprend tous les échantillons entrés dans OxCal pour créer le modèle statistique ainsi que les dates d'éruption calculées. Les échantillons sont associés avec leur densité de probabilité avant et après modélisation (partie 2). .....	96
Figure 28: Multiple plot sorti d'OxCal pour le modèle 700-1000 AD. Ce graphique reprend tous les échantillons entrés dans OxCal pour créer le modèle statistique ainsi que les dates d'éruption calculées. Les échantillons sont associés avec leur densité de probabilité avant et après modélisation (partie 3). .....	96
Figure 29: Multiple plot sorti d'OxCal pour le modèle 700-1000 AD. Ce graphique reprend tous les échantillons entrés dans OxCal pour créer le modèle statistique ainsi que les dates d'éruption calculées. Les échantillons sont associés avec leur densité de probabilité avant et après modélisation (partie 4). .....	97
Figure 30 : Single Plot sorti d'OxCal représentant les datations utilisées dans le code par rapport à la courbe de calibration au carbone 14 IntCal20.....	97

## 4.2 TABLEAUX

Tableau 1 : Résumé des périodes volcaniques du mont Fuji avec leurs caractéristiques (notamment le comportement volcanique) ainsi que les dates de chaque période (Takada, Yamamoto, Ishizuka, & Nakano, 2016). .....	23
Tableau 2 : Légende du tableau reprenant les outliers de la base de données. Ce tableau donne la raison pour laquelle un échantillon n'a pas été pris en compte dans le code final. ...	36
Tableau 3 : Tableau comprenant les outliers n'ayant pas été inscrits dans le code final. Chaque outlier est ici associé au numéro correspondant dans la base de données ainsi qu'à une justification de son aberrance. ....	36
Tableau 4 : Commandes utilisées dans le premier modèle simple et 'utilité dans le code (Bronck, s.d.). .....	38
Tableau 5 : Tableau de sortie d'OxCal pour le modèle complet. Ce tableau comprend les dates modélisées et l'intervalle dans lequel elles sont comprises, un degré de confiance correspondant aux datations modélisées ainsi que l'indice d' « agreement » A et l'indice de convergence C (partie 1). .....	40
Tableau 6 : Tableau de sortie d'OxCal pour le modèle complet. Ce tableau comprend les dates modélisées et l'intervalle dans lequel elles sont comprises, un degré de confiance correspondant aux datations modélisées ainsi que l'indice d' « agreement » A et l'indice de convergence C (partie 2). .....	40
Tableau 7 : Tableau de sortie d'OxCal pour le modèle complet. Ce tableau comprend les dates modélisées et l'intervalle dans lequel elles sont comprises, un degré de confiance	



correspondant aux datations modélisées ainsi que l'indice d' « agreement » A et l'indice de convergence C (partie 3). .....	41
Tableau 8 : Tableau de sortie d'OxCal pour le modèle complet. Ce tableau comprend les dates modélisées et l'intervalle dans lequel elles sont comprises, un degré de confiance correspondant aux datations modélisées ainsi que l'indice d' « agreement » A et l'indice de convergence C (partie 4). .....	41
Tableau 9 : Tableau de sortie d'OxCal pour le modèle complet. Ce tableau comprend les dates modélisées et l'intervalle dans lequel elles sont comprises, un degré de confiance correspondant aux datations modélisées ainsi que l'indice d' « agreement » A et l'indice de convergence C (partie 5). .....	42
Tableau 10 : Tableau de sortie d'OxCal pour le modèle complet. Ce tableau comprend les dates modélisées et l'intervalle dans lequel elles sont comprises, un degré de confiance correspondant aux datations modélisées ainsi que l'indice d' « agreement » A et l'indice de convergence C (partie 6). .....	42
Tableau 11 : Tableau de sortie d'OxCal pour le modèle complet. Ce tableau comprend les dates modélisées et l'intervalle dans lequel elles sont comprises, un degré de confiance correspondant aux datations modélisées ainsi que l'indice d' « agreement » A et l'indice de convergence C (partie 7). .....	43
Tableau 12 : Tableau de sortie d'OxCal pour le modèle complet. Ce tableau comprend les dates modélisées et l'intervalle dans lequel elles sont comprises, un degré de confiance correspondant aux datations modélisées ainsi que l'indice d' « agreement » A et l'indice de convergence C (partie 8). .....	43
Tableau 13 : Tableau de sortie d'OxCal pour le modèle complet. Ce tableau comprend les dates modélisées et l'intervalle dans lequel elles sont comprises, un degré de confiance correspondant aux datations modélisées ainsi que l'indice d' « agreement » A et l'indice de convergence C (partie 9). .....	44
Tableau 14 : Tableau de sortie d'OxCal pour le modèle complet. Ce tableau comprend les dates modélisées et l'intervalle dans lequel elles sont comprises, un degré de confiance correspondant aux datations modélisées ainsi que l'indice d' « agreement » A et l'indice de convergence C (partie 10). .....	44
Tableau 15 : Tableau récapitulatif de la modélisation des âges des éruptions du Mont Fuji ayant eu lieu pendant les périodes Subashiri-b et Subashiri-c. L'intervalle d'âge associé à chaque éruption se trouve dans la colonne 4 du tableau. ....	57
Tableau 16 : Base de données reprenant les datations carbone 14 brutes des couches stratigraphiques du Mont Fuji. Ce tableau combine les datations de plusieurs études (Takada, Yamamoto, Ishizuka, & Nakano, 2016). Les outliers n'ayant pas servi à la rédaction du code sont surlignés en rouge. ....	70
Tableau 17 : Tableau de sortie d'OxCal pour le modèle 700-1000 AD. Ce tableau comprend les dates modélisées et l'intervalle dans lequel elles sont comprises, un degré de confiance correspondant aux datations modélisées ainsi que l'indice d' « agreement » A et l'indice de convergence C (partie 1). .....	93
Tableau 18: Tableau de sortie d'OxCal pour le modèle 700-1000 AD. Ce tableau comprend les dates modélisées et l'intervalle dans lequel elles sont comprises, un degré de confiance correspondant aux datations modélisées ainsi que l'indice d' « agreement » A et l'indice de convergence C (partie 2). .....	93
Tableau 19: Tableau de sortie d'OxCal pour le modèle 700-1000 AD. Ce tableau comprend les dates modélisées et l'intervalle dans lequel elles sont comprises, un degré de	



confiance correspondant aux datations modélisées ainsi que l'indice d' « agreement » A et l'indice de convergence C (partie 3). ..... 94

Tableau 20: Tableau de sortie d'OxCal pour le modèle 700-1000 AD. Ce tableau comprend les dates modélisées et l'intervalle dans lequel elles sont comprises, un degré de confiance correspondant aux datations modélisées ainsi que l'indice d' « agreement » A et l'indice de convergence C (partie 4). ..... 94



## 5 ABRÉVIATIONS

---

AD	Anno Domini
BP	Before Present
$^{14}\text{C}$ ou $^{14}\text{C}$	Carbone 14
CQL2	Chronological Query Language
DAD	Dépôts d'avalanche de débris
DMR	Disaster Management Room
DRE	Dense-rock equivalent
FKFZ	Fujikawa-kako Fault Zone
IBR	Izu-Bonin Ridge
ka	Kilo années
KOT	Kawaka/Oruani tephra
kyr	Kilo Year
MCMC	Markov Chain Monte Carlo
SIG	Système d'information géographique
WMD	Wiggle match datation



## 6 INTRODUCTION

La prévention et la gestion des risques volcaniques représentent toujours un défi pour de nombreux pays autour du monde, notamment pour le Japon. Ce pays, situé sur la ceinture de feu du Pacifique et à la convergence de plusieurs plaques tectoniques (Augendre, 2006) (Takada, Yamamoto, Ishizuka, & Nakano, 2016), comporte sur son territoire une concentration de volcans très élevée. En effet, l'archipel nippon comptabilise 110 volcans dont 9 sont sous-marins, ce qui correspond à 17% des volcans terrestres au niveau mondial, et 7% de ceux qui sont submergés (Heimbürger, 2015).

Le Japon compte le Mont Fuji parmi ses volcans actifs. Situé sur l'île de Honshu, il est le point culminant du pays et se trouve à moins de 100 kilomètres de la ville de Tokyo (Takada, Yamamoto, Ishizuka, & Nakano, 2016). En cas d'éruption, la mégapole et ses 37 millions d'habitants seront fortement impactés : les vies économique, sociale et touristique seront chamboulées et la santé des habitants sera mise en péril (Chakraborty & Jones, 2018) (Yamamoto & Nakada, Chapter 14 - Extreme Volcanic Risks 2 : Mount Fuji, 2015) (World Population Review, 2022). Un système de monitoring poussé et des plans de gestion de crise et d'urgence ont été implémentés dans les préfectures directement concernées par cet aléa, ainsi qu'au niveau national (Augendre, 2006) (Cabinet Office - Government of Japan, 2004) (Yamanashi Prefecture Office, 2017). Malgré ces précautions mises en place et au vu des conséquences qu'une éruption peut avoir, il est important d'approfondir les connaissances scientifiques sur le Mont Fuji.

Ce travail présente la chronostratigraphie du Mont Fuji à partir de données collectées dans de multiples études et compilées dans le travail de Takada *et al.* (2016). Cette amélioration de la chronologie est réalisable grâce à l'utilisation du logiciel OxCal. Ce dernier utilise les datations au carbone 14 pour créer un modèle statistique des dépôts via la méthode de Monte-Carlo par chaîne de Markov (MCMC) (Ramsey C. B., 2009). Cela permet d'obtenir un ensemble de solutions possibles pour les dépôts stratifiés considérés. L'objectif global de ce travail est donc de réviser la chronostratigraphie du Mont Fuji via le logiciel OxCal dans le but de développer plus de connaissances sur le fonctionnement du volcan qui permettront d'anticiper des éventuelles éruptions. En effet, une meilleure chronologie des événements va aboutir à une évaluation plus précise de l'aléa volcanique et de sa récurrence.

La première section de cette étude définit plus amplement la question de recherche ainsi que la méthode et le logiciel utilisés. Ensuite, un contexte reprenant les spécificités du Mont Fuji (localisation, caractéristiques géologiques et géographiques, historique des éruptions...)



sera établi. La troisième partie développe la méthode mise en place pour réaliser ce travail. Subséquemment, les résultats seront donnés et discutés avant d'établir les perspectives futures du travail et les apports personnels.



## 7 QUESTION DE RECHERCHE

*L'objectif de ce travail est d'améliorer la chronostratigraphie du Mont Fuji via un modèle statistique.* Ici, la chronostratigraphie va être modélisée statistiquement grâce au logiciel OxCal pour obtenir le ou les résultats les plus probables de dépôt.

Pour obtenir une chronologie plus précise des éruptions du Mont Fuji, les informations sur l'ordre stratigraphique et les données carbone 14 brutes associées à chaque coulée vont être entrées dans le logiciel OxCal. Ce dernier va calibrer les datations grâce à la courbe de calibration IntCal20 et donner une densité de probabilité pour chaque échantillon. Grâce à la combinaison des deux types d'informations encodées (l'ordre stratigraphique et les datations), le logiciel va réduire les fenêtres de probabilité d'âge des dépôts volcaniques et fournir une chronologie de l'ensemble des produits éruptifs du Mont Fuji sur la période étudiée. In fine, cela va permettre de réévaluer la récurrence des éruptions et de préciser ainsi l'aléa volcanique. Cette méthode servant à obtenir une chronologie des dépôts est utilisée dans d'autres études scientifiques sur les volcans (Reuther, Potter, Coffman, Smith, & Bigelow, 2020) (Vandergoes, et al., 2013) (Watkins, et al., 1978), et dans d'autres domaines comme l'archéologie (Sraka, 2013) ou la paléosismologie (DuRoss, Personius, Crone, Olig, & Lund, 2011). Cette démarche n'a jamais été réalisée dans le cas du Mont Fuji.

Perfectionner la chronostratigraphie permet d'en apprendre plus sur la chronologie des événements volcaniques, l'aléa volcanique du Mont Fuji ou encore l'histoire du volcan. En effet, cette étude met au point une amélioration chronologique et, par conséquent, permettra par la suite de calculer plus précisément les temps de récurrence de l'aléa volcanique. Enfin, les résultats obtenus dans ce travail pourront éventuellement aider au développement des connaissances sur le Mont Fuji en étant, par exemple, réutilisés par la suite dans d'autres études ou inclus dans les plans japonais de gestion des crises.

### 7.1 PRÉSENTATION DU LOGICIEL UTILISÉ ET DE SON FONCTIONNEMENT

L'outil utilisé pour parvenir à cet objectif global est le logiciel OxCal. Ce dernier a été développé par Christopher Bronk Ramsey et permet d'établir un modèle chronostratigraphique pour les sites archéologiques ou géologiques tels que le Mont Fuji. En plus d'analyses très simples telles que la calibration d'échantillons, ce logiciel permet deux types d'analyses majeures (Ramsey C. B., OxCal 4.4 Manual, 2021) :

- 1) Calculer l'âge probable d'échantillons datés par carbone 14, notamment via la calibration carbone ;



- 2) Analyser un groupe d'évènements qui sont liés les uns aux autres via des relations stratigraphiques ou bien par des regroupements génériques. Cette analyse permet de créer un modèle statistique de la chronostratigraphie en définissant une densité de probabilité pour chaque échantillon daté qui est rentré dans le modèle. C'est ce qui est développé au long de ce travail.

Dans ce contexte, OxCal est employé pour construire un modèle comprenant des éléments ayant des relations entre eux, en utilisant des statistiques bayésiennes. Ce type de modèles statistiques définit la densité de probabilité pour qu'une théorie se réalise compte tenu de certains évènements qui ont été observés (Robert & Marin, 2009). L'utilisation de ce type de statistiques implique le développement de certaines hypothèses appelées « a priori » qui sont ensuite utilisées pour générer les modèles (Ramsey C. B., 2000). Les deux aspects suivants sont employés dans ces modèles :

- A priori (prior) : ce sont les hypothèses employées, les informations connues à propos d'un système avant même de commencer la modélisation statistique ; ici, l'ordre stratigraphique ou les datations non calibrées ;
- A posteriori (posterior) : ce sont les informations obtenues d'après les analyses des données historiques, des datations au carbone 14 ou autres, comme les datations après calibration dans ce cas-ci.

Pour étudier la chronologie d'un groupe d'évènement et mettre au point un modèle statistique, ces deux types d'informations sont donc exploitées : les datations absolues (posterior) et les dates relatives (prior). La différence entre les deux est que le premier type provient d'échantillons et le deuxième donne une information plus complexe sur la chronologie des évènements. C'est à cause de cette différence que les statistiques bayésiennes sont utilisées dans le logiciel et plus généralement dans les analyses chronologiques. Le problème est que la distinction entre les deux types d'information est arbitraire (Ramsey C. B., OxCal 4.4 Manual, 2021) (Robert & Marin, 2009).

Dans les modèles statistiques de déposition, le but est de trouver un ensemble de dates possibles pour chaque séquence sédimentaire. Cela est fait via la méthode de Monte-Carlo par chaîne de Markov (MCMC) qui donne une distribution de solutions possibles. Cette méthode permet à l'algorithme (Metropolis-Hastings) de trouver toutes les solutions possibles en les couplant aux probabilités des a priori et des a posteriori. Les éléments déjà datés au carbone 14 seront calibrés dans le modèle grâce à l'utilisation des statistiques bayésiennes qui reprennent



notamment les informations de la courbe de calibration  $^{14}\text{C}$  (Ramsey C. B., 2009). L'utilisation de ces différents types d'informations dans le logiciel permet d'obtenir les densités de probabilités postérieures.

## 7.2 AUTRES ÉTUDES UTILISANT LA MÊME APPROCHE AVEC OXCAL

Le modèle OxCal, qui permet d'améliorer la datation de certains échantillons et la chronostratigraphie, a été utilisé plusieurs fois dans des publications récentes (DuRoss, Personius, Crone, Olig, & Lund, 2011) (Reuther, Potter, Coffman, Smith, & Bigelow, 2020) (Xu, et al., 2012) (Tani, et al., 2013). Cependant, les modèles statistiques d'OxCal sont souvent utilisés dans une seule étape de ces publications. C'est le cas de l'étude de Xu *et al.* (2012) qui examine le volcan chinois de Changbaishan. Ce volcan est entré en éruption aux alentours du milieu du 10<sup>ième</sup> siècle (AD) et est suspecté d'avoir généré une des plus importantes éruptions de l'Histoire, ce qui aurait eu des conséquences sur le climat (Xu, et al., 2012). Le but de l'étude est de préciser la chronologie de l'éruption pour confirmer ou infirmer ce qui a été trouvé dans les preuves historiques. Cela permet par la suite de définir l'impact climatique de l'éruption via des carottages dans la glace au Groenland. Dans un premier temps, les modèles bayésiens d'OxCal sont utilisés pour préciser la date de l'éruption avec un matériel organique échantillonné très précis (ce qui n'est pas forcément le cas dans ce travail, voir « 9. Matériel et méthode »). Ensuite, grâce à cette date estimée à 946 AD  $\pm 3$ , des liens ont été fait avec les sulfates volcaniques retrouvés dans la glace. Dans le cas de l'étude présentée ici, l'objectif d'amélioration de la chronologie d'un volcan est similaire. Cependant, Xu et al. (2012) se sont focalisés sur une seule éruption qui avait déjà été étudiée auparavant. En ce qui concerne le Mont Fuji, aucun modèle de chronostratigraphie n'avait été proposé antérieurement.

Un autre exemple d'étude similaire à celle du Mont Fuji est la « Age Determination of the Kawagodaira Volcanic Eruption in Japan by  $^{14}\text{C}$  wiggle-matching ». L'objectif est de nouveau comparable : le tephra marqueur provenant du volcan Kawagodaira qui s'est déposé dans plusieurs régions japonaises va être daté à nouveau, de manière plus précise (car l'histoire du volcan a été étudiée depuis longtemps) (Tani, et al., 2013). Tout comme dans l'étude de Xu *et al.* (2012), le matériel organique utilisé pour les échantillons est connu : il s'agit d'un cèdre japonais piégé dans le dépôt pyroclastique. L'éruption a finalement été datée à 1210-1187 cal BC avec un niveau de confiance de 95,4% (Tani, et al., 2013).

L'étude menée par DuRoss *et al.* (2011) s'intéresse à l'amélioration de la chronologie des tremblements de terre de la zone de la faille de Wasatch au niveau du segment Weber. Grâce aux modèle statistiques d'OxCal, des fonctions de densité de probabilités des évènements



sismiques ont été obtenues et une récurrence des événements sismiques de cette zone précise a pu être calculée. Les chercheurs ont utilisé différents types d'échantillons (sédiments, charbon etc.) pour la datation et se sont intéressés à plusieurs événements (DuRoss, Personius, Crone, Olig, & Lund, 2011), tout comme ce travail sur le Mont Fuji.

Reuther *et al.* (2020) ont également utilisé OxCal et la modélisation bayésienne pour dater de manière plus précise l'évènement volcanique « White River Ash » en Alaska. Cette éruption a laissé une couche de tephra dans la zone de la région volcanique de Wrangell. Plus d'une trentaine d'échantillons datés au carbone 14 trouvés en-dessous et au-dessus du tephra ont été utilisés (Reuther, Potter, Coffman, Smith, & Bigelow, 2020). Le modèle obtenu avec OxCal a finalement daté ce tephra entre 1689 et 1560 cal BP, ce qui correspond à un intervalle de temps de 90 à 200 ans plus tôt que les estimations données dans les études précédentes selon Reuther *et al.* (2020). Une fois de plus, contrairement à l'étude du Mont Fuji, la chronologie d'une seule éruption est datée plus précisément.

La plupart des études citées ci-dessus utilisent les modèles statistiques d'OxCal pour modéliser l'âge d'un événement ayant déjà été étudié et pour obtenir une chronologie plus précise (Xu, et al., 2012) (Tani, et al., 2013) (Reuther, Potter, Coffman, Smith, & Bigelow, 2020). Dans le cas de l'étude présentée dans ce travail, le but est d'affiner la chronostratigraphie du Mont Fuji, ce qui implique l'étude de plusieurs événements volcaniques comme dans l'étude de DuRoss *et al.* (2011). De plus, comme expliqué précédemment, le matériel organique utilisé pour la réalisation de la datation au carbone 14 a été choisi scrupuleusement dans certaines autres études, mais la base de données utilisée pour cette étude sur le Mont Fuji ne donne pas d'indication sur l'origine du matériel échantillonné. Cela a pour conséquence la création d'hypothèses pour la construction du code (voir section « 9. Matériel et méthode »).



## 8 CONTEXTE

### 8.1 LOCALISATION ET GÉODYNAMISME

Le Mont Fuji est une montagne et stratovolcan actif se situant sur la côte sud de l'île de Honshu au Japon. En plus d'être le symbole de l'archipel nippon, il en est le point culminant, avec ses 3775.5 mètres d'altitude (Takada, Yamamoto, Ishizuka, & Nakano, 2016). Comme indiqué sur la figure 1 ci-dessous, le Mont Fuji se trouve à environ 100 kilomètres au sud-ouest de l'agglomération de Tokyo.



Figure 1 : Carte de la géographie du Japon. Le Mont Fuji est ici représenté par un triangle noir ([www.lonelyplanet.fr](http://www.lonelyplanet.fr)).

Le volcan s'est formé sur deux édifices volcaniques plus anciens et, comme le montre la figure 2, sur la zone de jonction entre la plaque tectonique eurasiennne (arc japonais sud-ouest) et la plaque tectonique de la mer des Philippines (Takada, Yamamoto, Ishizuka, & Nakano, 2016). La plaque tectonique nord-américaine NA passe également à proximité du volcan (Takada, Yamamoto, Ishizuka, & Nakano, 2016) (Encyclopaedia Universalis, s.d.).

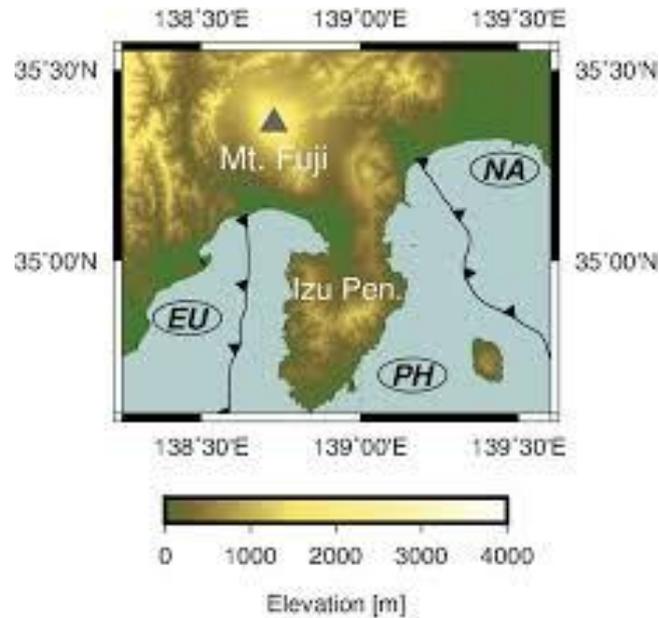


Figure 2 : Carte représentant les trois plaques tectoniques influençant le volcanisme du Mont Fuji, notamment via un phénomène de subduction. EU représente la plaque eurasiennne, PH représente la plaque de la mer des Philippines et NA représente la plaque nord-américaine. Il y a une subduction de PH sous EU au niveau de la ligne dentée séparant les deux plaques (Hosono, Mitsui, Ishibashi, & Jun, 2016).

Le Mont Fuji fait d'ailleurs partie de la « ceinture de feu du Pacifique » qui est une expression utilisée pour désigner les volcans se trouvant sur la bordure de l'océan pacifique (cette zone correspond aussi aux limites de plusieurs plaques en subduction) (Augendre, 2006). L'activité magmatique du volcan Fuji est expliquée par cette position particulière et du fait de la subduction de la plaque nord-américaine en dessous des plaques eurasiennne et de la mer des Philippines. Cela duplique la croûte en-dessous du volcan et donne lieu à de l'activité volcanique et sismique associé selon Takada *et al.* (2016).

La figure 3 (a) ci-dessous montre que le Mont Fuji est aligné sur la chaîne volcanique Izu-Bonin (IBR). Celle-ci se trouve à proximité de la plaque plongeante nord-américaine qui est représentée par les traits non continus (Nakajima & Hasegawa, 2007). Selon Nakajima et Hasegawa (2007), la subduction de cette plaque a une vélocité de 3 à 5 centimètres par an. De plus, la plaque nord-américaine subduit le long d'Izu-Bonin avec une vitesse d'environ 8 centimètres par an.

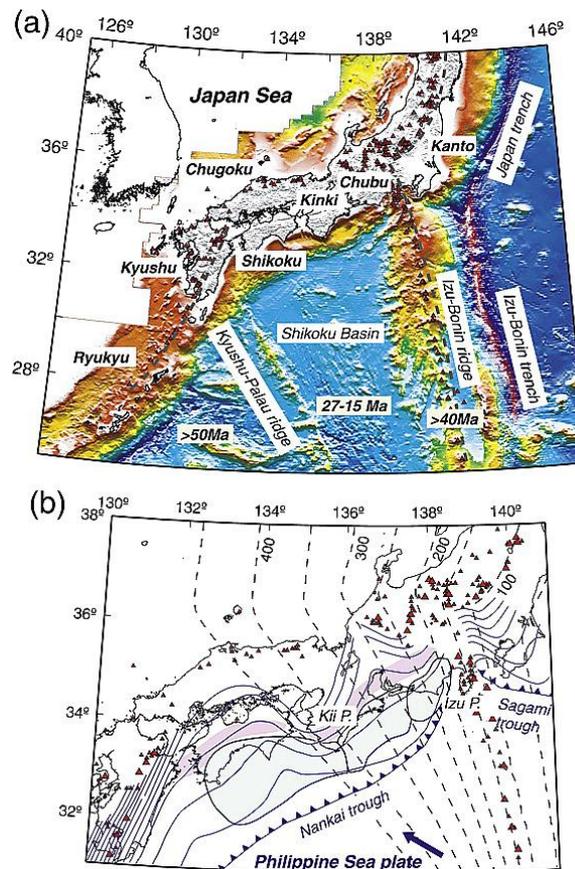


Figure 3 : (a) Carte de la morphologie de l'archipel japonais avec les volcans quaternaires actifs représentés par des triangles rouges. Le Mont Fuji se trouve sur la chaîne de montagnes IBR. Cela influence l'activité du volcan, notamment à cause de la subduction de la plaque nord-américaine (b) Carte des iso-profondeurs représentées par les lignes non continues (intervalle de 50 km) pour la plaque nord-américaine, par les lignes bleues (intervalle de 10 km) pour la plaque de la Mer des Philippines (Nakajima & Hasegawa, 2007).

De plus, selon Yamamoto et Nakada (2015), il existe un système de faille actif passant à l'ouest du Mont Fuji : il s'agit du système de Fujikawa-kako (FKFZ) présenté sur la figure 4 ci-dessous.

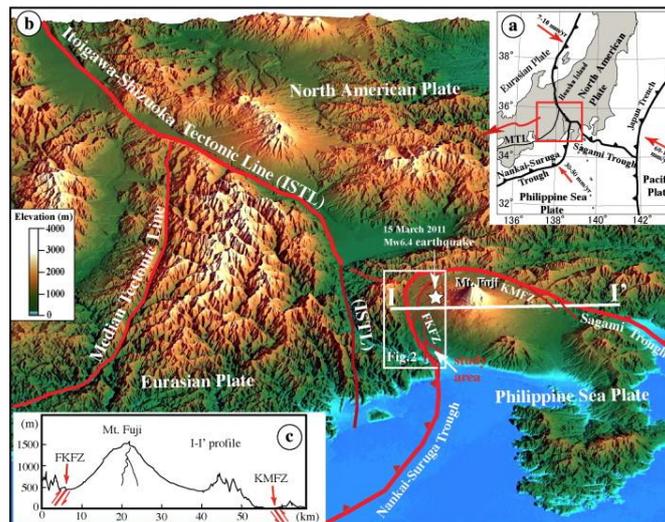


Figure 4: La carte (a) représente le contexte tectonique de la zone autour du Mont Fuji. Celui-ci se trouve à proximité de failles et de plaques tectoniques. La carte (b) présente le relief ainsi qu'une vue en perspective de la zone autour du Mont Fuji. La carte (c) montre un profil topographique de la FKFZ passant à l'ouest du Mont Fuji (Aiming, Kenta, & Hideto, 2013).

Le pied sud-ouest du Mont Fuji a d'ailleurs été déformé par ces failles actives. Selon plusieurs sources, entre six et dix ruptures d'une magnitude d'environ M8 ont eu lieu pendant les 10.000 dernières années, la dernière datant d'il y a 8 siècles (Takada, Yamamoto, Ishizuka, & Nakano, 2016) (Yamamoto & Nakada, Chapter 14 - Extreme Volcanic Risks 2 : Mount Fuji, 2015). Cependant, il n'existe aucun lien entre l'activité de ces failles et le volcanisme du Mont Fuji (Yamamoto & Nakada, 2015).

C'est pour ces multiples raisons que la zone du Mont Fuji est caractérisée par une géodynamique complexe.

## 8.2 ERUPTIONS HISTORIQUES ET HISTORIQUE D'ACTIVITÉ

### 8.2.1 ERUPTIONS HISTORIQUES

Dans ce travail, les éruptions historiques sont les éruptions dont les dates de preuves historiques correspondent aux preuves géologiques de l'évènement étudié. Par exemple, il faut faire correspondre une datation calibrée au carbone 14 à d'anciens articles de journaux ou à des récits sur l'éruption. Le tephra marqueur, quant à lui, est le tephra provenant d'une éruption d'un autre volcan que celui étudié. Dans certains cas, ce dernier peut être associé à une date historique. Le tephra marqueur va se déposer et faire partie des couches stratigraphiques de la zone volcanique étudiée, ce qui peut aider à la datation des dépôts volcaniques antérieurs et postérieurs.

Le Mont Fuji est considéré comme étant toujours en activité puisqu'il est entré en éruption plusieurs fois depuis les 10 000 dernières années (Williams, 2016), sa dernière



éruption en date (nommée Hoei) ayant eu lieu en 1707. Cette dernière est une des deux éruptions historiques connues et décrites dans de nombreux documents de l'époque. Hoei était une éruption plinienne qui s'est produite sur 3 cratères du flanc nord-est du Mont Fuji et qui a commencé le 16 décembre 1707 pour finir le 1<sup>er</sup> janvier 1708. Le volume de déchets volcaniques éjectés était de 0,68 km<sup>3</sup> DRE<sup>1</sup> (Miyaji & Koyama, 2007) et les cendres ont atteint les villes de Tokyo et Yokohama situées à environ 100 km à l'est du volcan. C'est d'ailleurs le pire épisode de chute de cendres de l'histoire du Japon selon Miyaji *et al.* (2011). Cette éruption a généré la création de nombreux lahars subséquents et il a fallu environ 100 ans pour que le pays et surtout les alentours du volcan se remettent de cette éruption (Inoue, 2007).

La seconde éruption historique a été nommée Jogan. Elle fut l'une des plus importantes éruptions du mont Fuji et a duré de 864 à 866 AD. Elle a donné naissance à la coulée de lave Aokigahara et le volume total d'éruption a été estimé à 1,3 ±0,2 km<sup>3</sup> DRE (Takada, Yamamoto, Ishizuka, & Nakano, 2016). La lave a coulé dans le lac Senoumi, ce qui l'a scindé en deux parties distinctes appelées par la suite les lacs Sojiko et Saiko (Arai, et al., 2003).

Il existe d'autres éruptions historiques, mais l'association entre ces éruptions et les produits volcaniques éjectés est toujours un travail en cours (Kobayashi, Takada, & Nakano, 2007).

Le tephra marqueur de Kozushima-Tenjosan (datant de 838 AD) est de type silicique et est largement distribué autour du Mont Fuji. La provenance de ce tephra n'est toujours pas avérée à 100%, mais certains scientifiques pensent qu'il pourrait être originaire des îles Izu au sud (Kozushima et Niijima). En effet, le tephra qui s'est déposé sur le Mont Fuji est de même composition que le sol volcanique de ces îles (Kobayashi, Takada, & Shun, 2007).

### 8.2.2 HISTORIQUE D'ACTIVITÉ

Le volcan Fuji est passé par trois périodes principales d'activité qui ont commencé il y a environ 100.000 ans : les périodes Hoshiyama, Fujinomiya et Subashiri. L'historique d'activité du Mont Fuji pour les 8000 dernières années a été divisé en quatre sous-périodes (Subashiri-a, -b, -c et -d). Chacune d'entre elle a duré entre 1000 et 3000 ans. Le style des éruptions a changé au cours des années mais il est impossible de remarquer une tendance dans ces changements de style. En effet, de 300 BC à 1100 AD, les éruptions étaient accompagnées de coulées de lave sortant de fissures. Lors de la dernière éruption Hoei en 1707, aucune coulée

---

<sup>1</sup> Le Dense Rock Equivalent (DRE) est un calcul volcanologique donnant le volume estimé des éjectas d'une éruption volcanique (lave, cendres...) (Watkins, et al., 1978) (Encyclo.co.uk - English Encyclopedia, s.d.). Le DRE s'exprime d'habitude en km<sup>3</sup>.



de lave n'a pu être observée. Cela laisse à penser que le volcan est rentré dans une nouvelle période, ce qui rend extrêmement ardue la prédiction de la forme de la prochaine éruption, comme expliqué ci-après dans la section « 8.3 Caractéristiques géologiques » (Takada, Yamamoto, Ishizuka, & Nakano, 2016).

Ces différentes périodes et leurs caractéristiques sont décrites de manière brève dans le tableau 1 ci-dessous (Takada, Yamamoto, Ishizuka, & Nakano, 2016) :

*Tableau 1 : Résumé des périodes volcaniques du mont Fuji avec leurs caractéristiques (notamment le comportement volcanique) ainsi que les dates de chaque période (Takada, Yamamoto, Ishizuka, & Nakano, 2016).*

Nom de la période	Date	Caractéristiques
<b>Hoshiyama</b>	100 000 à 15 000 cal BC	Eruptions explosives, formation de 140 scories, couverture du volcan par de la glace lors de la période de glaciation (100 000 à 18 000 cal BC), effondrement d'une partie du volcan au sud et à l'est en 18 000 cal BC formant les dépôts d'avalanches de débris.
<b>Fuijnomiya</b>	15 000 à 6000 cal BC	Reconstruction de l'édifice volcanique grâce à l'avalanche Tanukiko (18 000 cal BC), éruptions de coulées de laves basaltiques depuis la portion centrale du volcan, plusieurs éruptions au niveau du pied nord-est du volcan, développement de scories (9600 à 7100 cal BC), éruption au niveau du flanc sud-ouest conduisant à la création de la scorie Murayama (8000 cal BC).
<b>Subashiri-a</b>	6000 à 3600 cal BC	Décroissance drastique de l'activité volcanique avec uniquement des éruptions à petite échelle, création d'une couche de sol noire qui détermine une frontière entre l'Ancien et le Jeune Fuji.
<b>Subashiri-b</b>	3600 à 1500 cal BC	Augmentation de l'activité volcanique avec création du cône connu aujourd'hui (jusqu'en 2100 cal BC), violente éruption pyroclastique en 2800 cal BC.
<b>Subashiri-c</b>	1500 à 300 cal BC	Éruptions pliniennes et sub-pliniennes au sommet du volcan entre 1500 et 1300 cal BC, éruptions explosives sur les flancs formant des scories de 1300 à 700 cal BC, effondrement du



		flanc est vers 900 cal BC, dominance des éruptions basaltiques provenant du sommet, génération de coulées pyroclastiques basaltiques et de coulées de lave par les dépôts pyroclastiques.
<b>Subashiri-d</b>	300 cal BC à aujourd'hui	Dernière éruption du sommet (Kengamine Eruption), activité plus élevée sur les flancs est et nord-est avant 700 cal AD, augmentation de la fréquence des éruptions de sommet de 700 à 1000 cal AD (intervalle de 20 à 30 ans), diminution de l'activité volcanique de 1100 à 1700 cal AD, éruption Hiei provenant de 3 cratères sur le flanc sud-est.

La figure 5 ci-dessous montre les produits éruptifs en fonction des périodes Hoshiyama, Fujinomiya et Subashiri (Yamamoto, Nakano, & Ishizuka, 2021). Elle reflète les périodes avec plus ou moins d'activité. En effet, il n'y a pas d'unité cartographiée pour Subashiri-a puisque cette période est caractérisée par une forte baisse de l'activité volcanique (Takada, Yamamoto, Ishizuka, & Nakano, 2016).

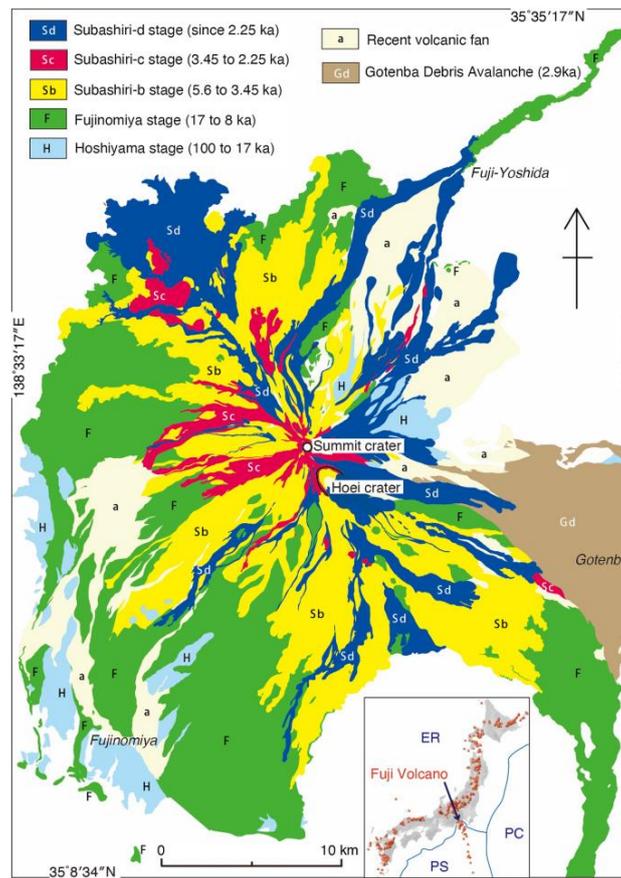


Figure 5 : Carte géologique simplifiée du Mont Fuji montrant les produits éruptifs correspondant à chaque période volcanique. Cela reflète les périodes avec plus ou moins d'activité. La carte d'index dans le fond à droite représente la localisation du Mont Fuji par rapport à l'archipel japonais. Les triangles rouges représentent les volcans quaternaires ; ER = Eurasia Plate, PC = Pacific or North-American Plate et PS = Philippine Sea Plate. (Yamamoto, Nakano, & Ishizuka, 2021).

### 8.3 CARACTÉRISTIQUES GÉOLOGIQUES

Le volcan Fuji est caractérisé par des particularités qui le différencient des autres volcans ou qui rendent compliquées les prédictions de l'activité volcanique future et l'appréhension du fonctionnement du volcan (Takada, Yamamoto, Ishizuka, & Nakano, 2016).

En effet, le Mont Fuji est le plus grand volcan basaltique du Japon. Il a principalement expulsé du magma basaltique lorsqu'il était en activité (Takada, Yamamoto, Ishizuka, & Nakano, 2016). La composition chimique exacte des produits expulsés par le volcan a changé au fil des millénaires mais reste toujours majoritairement basaltique depuis la naissance du volcan (Yamamoto, Nakano, & Ishizuka, 2021) (Geological Survey of Japan, AIST, s.d.). Comme le montre la figure 6 ci-dessous, les produits éruptifs ont une composition variable en fonction des périodes traversées (Yamamoto, Nakano, & Ishizuka, 2021). Les produits éruptifs provenant de la dernière éruption de 1707 (appelée Hiei), renseignée sur la figure comme Sd-Ho, semblent être un peu plus séparés du nuage de points que les produits résultant d'autres explosions.

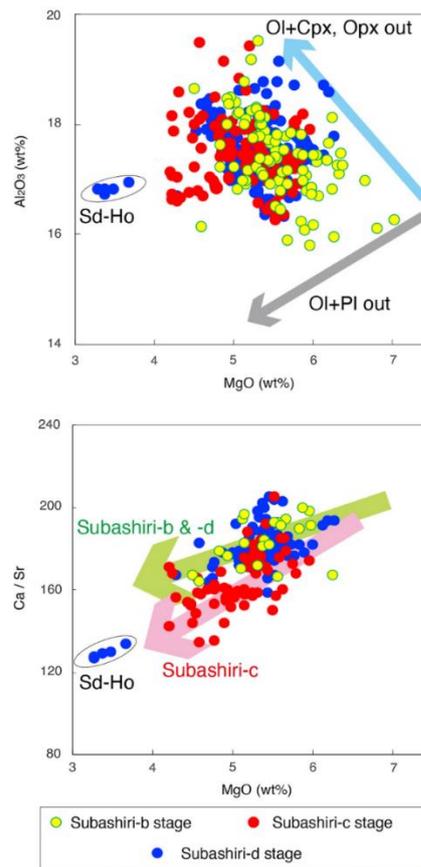


Figure 6 : Diagramme de variation de composition des produits éruptifs du Mont Fuji pendant les périodes Subashiri-b, Subashiri-c et Subashiri-d). Les éruptions sont principalement basaltiques (Yamamoto, Nakano, & Ishizuka, 2021).

Ensuite, le style éruptif varie. En effet, le volcan donnait naissance à des éruptions explosives lors de la période d'Hoshiyama (100 000 à 15 000 cal BC) qui se sont transformées en éruptions avec des coulées de lave volumineuses lors de la période Fujinomiya (15 000 à 6000 BC) (Yamamoto, Nakano, & Ishizuka, 2021). Ensuite, pendant la période actuelle Subashiri, les éruptions sont devenues pliniennes, sub-pliniennes ou encore stromboliennes avec des coulées de lave et/ou des coulées pyroclastiques. L'éruption Hiei de 1707 était d'ailleurs la seule éruption plinienne des 2000 dernières années. Selon Takada *et al.* (2016), cette caractéristique complique l'exercice de préparation d'atténuation des catastrophes volcaniques.

Enfin, le volume des éruptions et l'intervalle entre celles-ci varient. Lors des 15.000 dernières années, plusieurs éruptions avec des volumes de plus d'1 km<sup>3</sup> de déchets éruptifs ont eu lieu. Le volcan a connu une période très peu active de 6000 à 3600 cal BC et également de 900 BC à aujourd'hui, à l'exception de l'éruption de Hiei datant de 1707 (Takada, Yamamoto, Ishizuka, & Nakano, 2016). Avant la période d'Hoshiyama, le volume éruptif était de 3,5 km<sup>3</sup> DRE/kyr, pour redescendre à 0,8 km<sup>3</sup> DRE/kyr pendant la période d'éruptions explosives



d'Hoshiyama (voir tableau 1). Après la période Subashiri-a avec moins d'activité volcanique (voir tableau 1), le volume éruptif a augmenté à nouveau pour atteindre  $2,0 \text{ km}^3 \text{ DRE/kyr}$  (Yamamoto, Nakano, & Ishizuka, 2021). Pour les experts, c'est cette particularité du Mont Fuji qui complique la prédiction de l'activité volcanique future selon Takada *et al.* (2016).

Les deux graphiques ci-contre permettent de visualiser la variabilité des éruptions du Mont Fuji et la difficulté à prévoir les prochaines éruptions. La figure 7 ci-dessous confirme que l'intervalle entre les éruptions n'est pas fixe. Il varie en fonction des périodes que traverse le Mont Fuji. La figure 8 ci-dessous permet de se rendre compte de la variabilité des volumes éruptifs durant les différentes phases.

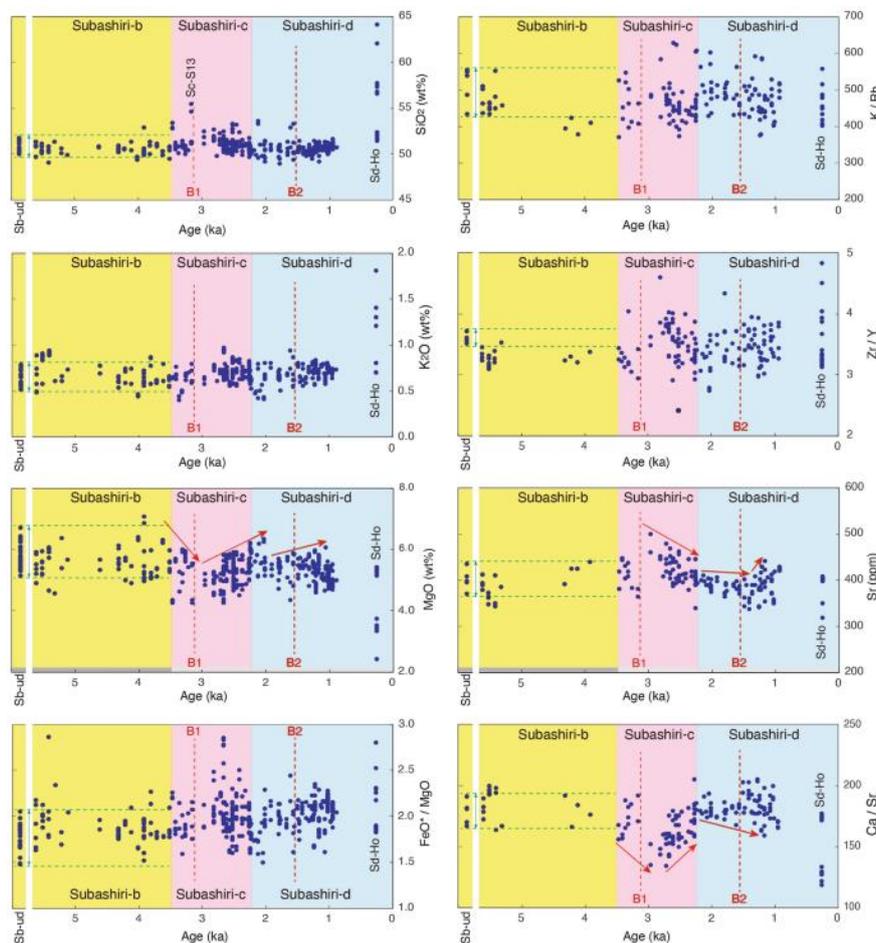


Figure 7 : Variations temporelles de la géochimie des produits éruptifs du Mont Fuji depuis la période Subashiri-b (Yamamoto, Nakano, & Ishizuka, 2021). Ce graphique montre également que les intervalles entre les événements volcaniques ne sont pas égaux.

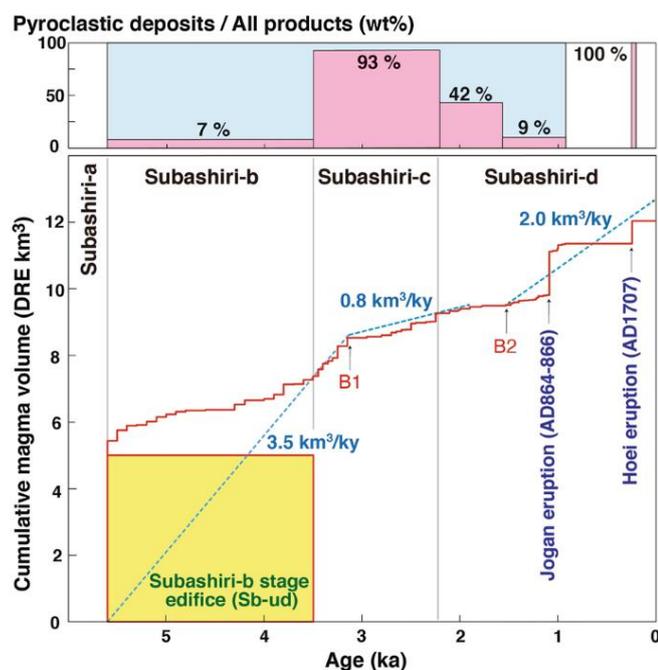


Figure 8 : Volumes cumulés de magma éruptif (et ratio pyroclastique) pour les périodes Subashiri-b, -c et -d (Yamamoto, Nakano, & Ishizuka, 2021). Les éruptions historiques de Jogon et Hoen sont renseignées. Ce graphique montre que les volumes éjectés par le volcan varient d'une éruption à l'autre pendant les périodes représentées.

## 8.4 RISQUE ET ALÉA VOLCANIQUE

### 8.4.1 DÉFINITION DE L'ALÉA VOLCANIQUE

Selon J-F Heimburger (2015), l'aléa volcanique se définit comme « *la possibilité d'une éruption, période durant laquelle le volcan rejette du magma et/ou d'autres matières (vapeurs d'eau, cendres, roches)* ». Les manifestations d'une éruption peuvent être diverses, mais les principales sont la nuée ardente, le lahar, la coulée de lave et le tsunami (dans le cas d'une éruption sous-marine) (Heimburger, 2015).

### 8.4.2 CONSÉQUENCES

Malgré la préparation des autorités, le suivi des scientifiques (détaillé dans les points suivants) et la classification du volcan Mont Fuji en alerte de niveau 1<sup>2</sup> (Heimburger, 2015), la menace d'une éruption est plus présente qu'avant. Comme expliqué dans la partie « 9.1 Localisation et géodynamisme », le mont Fuji se trouve à proximité de la ville de Tokyo. En cas d'éruption, cette mégapole de plus de 37 millions sera très fortement impactée (World Population Review, 2022) (Yamamoto & Nakada, 2015). La plus grosse menace sur la capitale est le dépôt des cendres (Yamamoto & Nakada, 2015).

<sup>2</sup> L'échelle de classification de niveau d'alerte pour les volcans terrestres comporte 3 niveaux, le niveau 1 étant le plus faible (Heimburger, 2015).



En effet, selon Yamamoto et Nakada (2015), si une éruption plinienne comme celle de Hoei se produisait à nouveau (ce qui est le plus probable<sup>3</sup>), la capitale serait recouverte d'une épaisse couche de cendres. La figure 9 ci-dessous montre la répartition du tephra après l'éruption Hoei de 1707. Ce sont les villes situées à l'est du volcan qui ont été les plus touchées par le dépôt de cendres lors de cet évènement : cela s'explique par la direction des vents, selon Aoki *et al.* (2019). Environ 100 millimètres de cendres se sont accumulés à l'époque sur la ville de Tokyo (Miyaji, Kan'no, Kanamaru, & Mannen, 2011) (Aoki, Tsunematsu, & Yoshimoto, 2019).

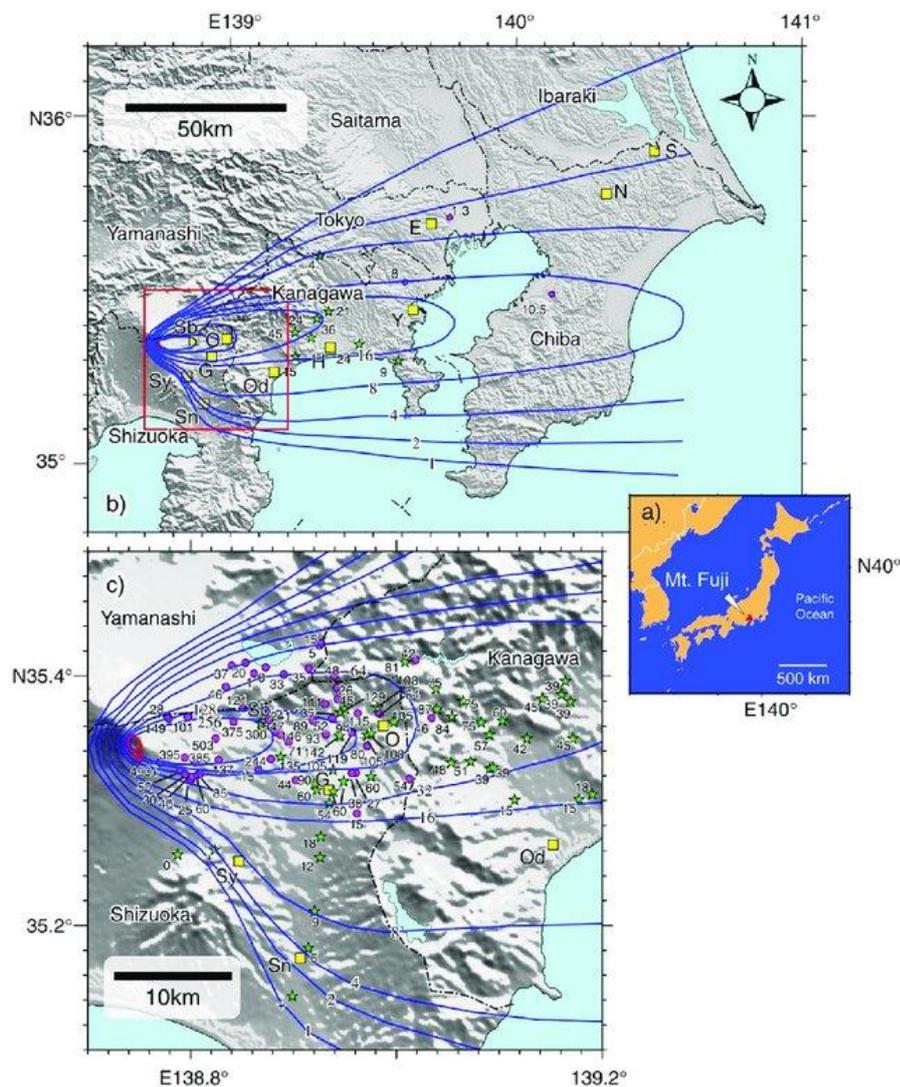


Figure 9 : Carte des isopaques du tephra éjecté lors de l'éruption Hoei en 1707 AD. A cause des vents dominants, les villes situées à l'est du Mont Fuji sont plus impactées par les éjectas volcaniques. (a) Localisation du Mont Fuji par

<sup>3</sup> Le Mont Fuji est caractérisé par différents types d'éruption en fonction des phases qu'il traverse. Selon Yamamoto et Nakada (2015), il est probable que le volcan soit entré dans une nouvelle phase étant donné que Hoei était la première éruption de ce type. Cependant, il est compliqué de tirer des conclusions sur base d'une seule et unique éruption de cette nature.



*rapport au Japon. (b) Isopaques de l'entière du tephra rejeté lors de l'éruption. (c) Isopaque plus local. (Miyaji, Kan'no, Kanamaru, & Mannen, 2011).*

Si un évènement similaire à l'éruption Hoei a lieu, la vie économique et sociale du Japon, et plus particulièrement celle de la ville de Tokyo, sera impactée. La capitale exploite énormément l'énergie provenant de centrales thermales et en est dépendante. Pour continuer à exploiter ce système, il faudrait arrêter les centrales avant de retirer les cendres et de remplacer les filtres et les éventuelles parties abîmées (Yamamoto & Nakada, 2015). Des pannes d'électricité auraient donc lieu dans toute la ville, ce qui perturbera le bon déroulement des activités. En plus de cela, Tokyo connaîtra des dommages aux infrastructures, des perturbations du trafic aérien, des problèmes de production primaire à cause de l'impact sur les végétaux, etc.

Lors de la dernière éruption de Hoei, seulement un million de personnes habitaient à Tokyo, qui s'appelait Edo à l'époque. Les conséquences de l'éruption sur la population étaient limitées à des problèmes respiratoires dus à l'inhalation de cendres. Avec la densité de population actuelle, la zone est encore plus vulnérable et l'éruption pourrait mettre en péril la santé de plusieurs millions d'habitants (Yamamoto & Nakada, Chapter 14 - Extreme Volcanic Risks 2 : Mount Fuji, 2015).

Le Mont Fuji, symbole dans la culture japonaise, attire des milliers de touristes chaque année. Environ 300.000 personnes entreprennent l'ascension de la montagne avec 248.461 personnes passant par la huitième et dernière station en 2016 (Chakraborty & Jones, 2018). Selon Chakraborty et Jones (2018), l'ascension du Mont Fuji n'est pas la seule raison de la présence des touristes sur le site : ceux-ci souhaitent également découvrir les cratères, les cascades ou les cinq lacs répartis autour de la montagne. Toutes ces attractions touristiques pourraient disparaître, si éruption il y a. Cela participerait donc au déclin de l'économie de la région car le tourisme diminuerait fortement.

Tous ces impacts causeraient de monstrueuses pertes économiques, qui sont estimées entre 1,2 et 2,5 trillions de Yens selon les scénarios météorologiques et saisonniers (Cabinet Office - Government of Japan, 2004).

En plus des pertes économiques décrites ci-dessus, le Japon perdrait un héritage naturel. En effet, la biodiversité et les paysages du Mont Fuji sont exceptionnels. Plusieurs sites et constructions présents sur le Mont Fuji et dans les villages avoisinants sont également classés et pourraient être perdus en cas d'évènement volcanique (Yamanashi Prefecture Office, 2017) (Chakraborty & Jones, 2018). Il y aurait donc une perte culturelle et environnementale supplémentaire.



### 8.4.3 *MONITORING*

La première carte géologique du mont Fuji a été publiée par Tsuya en 1968 mais le suivi de l'activité du Mont Fuji a été initié seulement au début des années 80 (Takada, Yamamoto, Ishizuka, & Nakano, 2016). Dans leurs publications respectives, plusieurs scientifiques comme Machida, Uesugi ou encore Mijaji se sont également penchés sur la géologie, la pétrographie, la stratigraphie, entre autres, du volcan. Cela a permis de mieux connaître et comprendre ce dernier.

En plus de la mise à jour des cartes lors de nouvelles campagnes de terrain, un système de surveillance est mis en place. Le Mont Fuji fait partie des 17 volcans japonais qui sont observés de manière constante (Heimbürger, 2015). Un réseau de caméras de surveillance permet de réaliser en temps réel des observations d'une éventuelle activité volcanique ou de coulées de débris (Yamanashi Prefecture Office, 2017) (Sabo Office, s.d.). Selon le Sabo Office, il existe une « Disaster Management Room » (DMR) proche du volcan qui agrège plusieurs types d'informations pour prévenir d'un désastre et pour prendre des décisions dans l'urgence. Cette DMR a un rôle crucial dans la gestion et le contrôle des catastrophes. À Tokyo, l'Agence Météorologique Japonaise comporte un observatoire volcanologique surveillant, entre autres, l'activité du Mont Fuji. D'autres instruments sont disposés autour du volcan, tels que des pluviomètres, des stations mesurant le niveau de l'eau, des dispositifs contrôlant les rejets dans l'air, etc. (Igarashi, et al., 2004) (Sabo Office, s.d.).



## 9 MATÉRIEL ET MÉTHODE

### 9.1 BASE DE DONNÉES

L'ensemble de ce mémoire exploite la seconde version de la carte géologique du Mont Fuji de 2016 (Takada, Yamamoto, Ishizuka, & Nakano, 2016), qui établit la dernière mouture de la stratigraphie qui sera implantée telle quelle dans le logiciel OxCal. De plus, la base de données des datations choisies provient des notes explicatives associées à la carte géologique par Takada *et al.* (2016). Les auteur.e.s du texte ont compilé dans un tableau (voir Annexe I) toutes les datations au carbone 14 originales ou provenant de différentes publications et études ainsi que les dépôts volcaniques leur correspondant. Ce tableau comprend un ordre stratigraphique établi en fonction des différents travaux utilisés pour construire la carte géologique et la base de données associée. Après vérification de plusieurs publications (Yamamoto, Takada, Ishizuka, & Nakano, 2005) (Yamamoto, Nakano, Takada, & Kobayashi, 2011) (Suzuki, Takada, Ishizuka, & Kobayashi, 2007) (Tajima, Miyaji, Yoshimoto, Abe, & Chiba, 2007) (Yamamoto, Ishizuka, & Takada, 2007), le tableau proposé par Takada *et al.* (2016) semble complet : c'est pourquoi seules ces données seront utilisées.

Chaque échantillon daté a un code d'échantillonnage et une coulée à laquelle il se rapporte (commençant généralement par « Sd- »). Ces éléments sont repris dans le code pour nommer les datations, les phases et les éruptions calculées. Pour chaque échantillon, il est précisé son lien avec la strate de la coulée, c'est-à-dire si l'échantillon a été fait dans, en-dessous ou au-dessus de la couche en question. Cette information peut être retrouvée dans la colonne 5 de l'annexe I. De plus, pour chaque coulée, le type de produit volcanique lié à la coulée est précisé (lave, scorie, coulées pyroclastiques, par exemple). Il arrive que, pour certaines éruptions, plusieurs produits volcaniques soit renseignés car ils sont concomitants.

Il y a aussi des coulées historiques et un tephra marqueur qui sont indiqués dans le tableau de l'annexe I et dont la date d'éruption est implémentée telle quelle dans le logiciel OxCal.

### 9.2 LOGICIEL

Comme expliqué précédemment, OxCal (dans sa version 4.4) est utilisé pour créer les différents modèles et obtenir un modèle chronostratigraphique statistique cohérent afin d'améliorer la chronologie des produits éruptifs du mont Fuji. Le choix s'est arrêté sur ce logiciel car ce dernier existe depuis plus de 20 ans et a déjà fait ses preuves. Les statistiques bayésiennes y sont utilisées pour construire des modèles du même type et plusieurs études



scientifiques similaires à ce travail ont utilisé cet outil pour modéliser différentes problématiques (voir supra « 2. Question de recherche »).

### 9.3 CHOIX DE PÉRIODE

Il a été décidé de concentrer le modèle sur la sous-période Subashiri-b et après, soit de 3600 BP à nos jours. La volonté de se focaliser sur un intervalle de temps précis peut se justifier de différentes manières. En effet, prendre en compte l'entièreté de l'historique des éruptions du Mont Fuji est un travail complexe et extrêmement chronophage : il fallait donc procéder à un choix pour limiter la difficulté du travail. Ensuite, il n'est pas nécessaire d'inclure la sous-période Subashiri-a (6000 BP à 3600 BP) car, comme précisé précédemment, il y a eu peu d'activité volcanique à cette époque. De plus, la période sélectionnée est éloignée de la limite de datation au carbone 14 : cela signifie que, lors des analyses, la quantité de carbone 14 est normalement bien plus élevée que les bruits de fond des appareils de mesure (Demoulin, 2021).

### 9.4 MÉTHODOLOGIE GÉNÉRALE POUR LA CONSTRUCTION DU CODE

Les fonctionnalités existant dans le logiciel ainsi que les études scientifiques consultées pour la rédaction de la bibliographie ont démontré que plusieurs stratégies pouvaient être mises en place afin de réaliser ce travail. Tout d'abord, au lieu de prendre l'ensemble de la base de données des produits éruptifs et des datations au carbone 14 (Takada, Yamamoto, Ishizuka, & Nakano, 2016), il a été décidé de se concentrer et de créer un premier modèle appelé simple sur la période 700 à 1000 AD, période pendant laquelle la récurrence des éruptions était maximale. Cela correspond également à la période qui comporte le plus de contraintes pour établir le modèle chronostratigraphique : cette période comprend le plus de produits éruptifs historiques ou non, le plus de datations ainsi qu'un tephra marqueur (Kobayashi, Takada, & Shun, 2007). Les dates (carbone 14 et données historiques) qui ont été utilisées dans ce premier modèle simple se trouvent dans les lignes 1 à 35 de l'annexe 1. Une fois le premier code débogué, le reste des échantillons datés, soit 63 autres datations, a été entré dans OxCal pour inclure toute la période étudiée de 3600 BC à nos jours et pour établir le second modèle complexe. Des commandes spécifiques telles que *Span* et *Interval* ont aussi été rajoutées pour que l'analyse soit plus complète dans le modèle final.

Il est important de préciser que chaque ligne de code représentant une datation a été exécutée subséquentement ou par groupes d'échantillons de dates 14C pour celles appartenant à la même coulée. Cela permet de corriger plus facilement les erreurs simples liées au code.



Pour le modèle simple et le modèle complet, toutes les dates entrées dans OxCal étaient non calibrées. Elles sont accompagnées également de leur écart-type d'origine.

Tous les résultats de ce travail ont été obtenus avec la courbe de calibration IntCal20, proposée par défaut dans OxCal.

Les codes pour le modèle simple allant de 700 à 1000 AD et pour le modèle complet se trouvent respectivement dans les annexes II et III.

#### 9.4.1 ELIMINATION DES VALEURS ABERRANTES

Dans le cas de cette étude, une valeur aberrante (ou « outlier ») est une valeur qui semble anormale, extrême par rapport à l'ensemble des échantillons de la série chronologique (Romain, 2020). L'article de Reuther *et al.* (2020) discute des différentes méthodes prévues dans OxCal pour mettre en exergue les valeurs aberrantes (ou outliers ci-dessous) qui sont incluses dans le modèle. Il existe deux types de méthodes pour cela (Reuther, Potter, Coffman, Smith, & Bigelow, 2020) :

- Identifier manuellement les valeurs estimées aberrantes et les retirer du modèle ou bien les tester avec la commande `{Outlier (« Name », Probability);}`; placée juste après la commande `C_Date` (permettant d'introduire une date historique) ou la commande `R_Date` (permettant de calculer la distribution de vraisemblance pour une date calibrée). Il est également possible de placer la commande après toutes les dates pour tester ces dernières sans faire un modèle. Il y a également différents types de messages d'erreur apparaissant dans les résultats du code si une valeur est jugée aberrante par OxCal ;
- Coder un modèle de valeurs aberrantes en utilisant la commande `Outlier_Model("Name", Distribution, [Magnitude], [Type (t/r/s)]);` et la commande `{Outlier(0.05);}`; placée juste après la formule `C_Date` ou `R_Date`.

La première option est préférée à la deuxième dans un souci de temps et de praticité. Cependant, un processus itératif a été mis en place pour trier les valeurs aberrantes. Dans un premier temps, certaines datations semblent illogiques « à l'œil nu » et sont retirées manuellement. En effet, certains échantillons sont beaucoup plus âgés que d'autres qui figurent dans le même produit éruptif ou dans les produits éruptifs stratigraphiquement au-dessus et en-dessous, comme le montre le tableau de l'annexe I. Par exemple, lorsqu'il y a un ensemble de dates cohérentes pour une même coulée et une seule date plus ancienne, cela indique a priori qu'il s'agit d'un outlier, surtout lorsque la coulée stratigraphiquement en-dessous comprend des





Tableau 2 : Légende du tableau reprenant les outliers de la base de données. Ce tableau donne la raison pour laquelle un échantillon n'a pas été pris en compte dans le code final.

Couleur	Justification
	Date « outlier » selon OxCal (vraisemblance problématique)
	Date aberrante à vue d'œil
	Date entraînant un dysfonctionnement du logiciel (non convergence vers une solution)

Tableau 3 : Tableau comprenant les outliers n'ayant pas été inscrits dans le code final. Chaque outlier est ici associé au numéro correspondant dans la base de données ainsi qu'à une justification de son aberrance.

Numéro correspondant dans l'annexe I	Numéro de l'échantillon	Justification
84	Beta-167663 FJM405 (Scorie S_13)	
83	Beta-167662 FJM404 (Sc-God)	
82	Beta-16991 9 FJM410 (Sc-God)	
66	Beta-163326 1204C-5 (Sd-Kng)	
51	Beta-191028 04032802-5 (Sd-Tpf)	
50	Beta-191027 04032802-1 (Sd-Tpf)	
46	Beta-136403 FJM104 (Sd-Aos)	
40	Beta-191025 25-02-01C (Sd-Nak)	
41	Beta-309862 11100307 (Sd-Nak)	
32	Beta-222263 060528-3 (Sd-Onw1)	
28	Beta-187070 031203-1 (Sd-Kri)	
16	Beta-173171 021108-04-5C (Sd-Obu)	
12	Beta-173165 06-2C (Sd-Fud)	
9	Beta-224228 06111401 C-2 (Sd-Ken2)	
8	Beta-253391 08080303C (Sd-Ken2)	
7	Beta-197426 040603C-1 (Sd-Ken2)	
6	Beta-199183 FJ-59-2 (Sd-San)	

Sur les 98 éléments du tableau, 17 ont été retirés à cause de leur aberrance. Cela représente un peu plus de 17% du total des datations de la base de données.



#### 9.4.2 *ORDRE STRATIGRAPHIQUE*

Étant donné que l'objectif est de réaliser un modèle chronostratigraphique et que le langage utilisé pour le code est le Chronological Query Language (CQL2) (OxCal, s.d.), il est important de placer les lignes de codes dans l'ordre. Elles ont été encodées de la couche stratigraphique la plus ancienne à la plus récente, conformément aux lignes directrices du manuel d'utilisation d'OxCal.

Dans la base de données (Takada, Yamamoto, Ishizuka, & Nakano, 2016), il existe une colonne précisant à quel endroit de la couche l'échantillon a été réalisé, à savoir au-dessus, en-dessous ou au milieu de la couche. Cela a son importance dans le code car cela peut changer la position d'une ligne de code : elle peut se retrouver avant, après ou au sein d'une *Phase*<sup>4</sup>. Lorsqu'il n'y a qu'un seul échantillon, celui-ci peut se retrouver avant ou après la commande *Date* permettant de calculer la datation d'un évènement. Cette particularité a été prise en compte dans ce travail.

#### 9.4.3 *TYPES DE DATE*

Après plusieurs essais-erreurs et la consultation d'autres études, toutes les dates composant le code ont été entrées au sein d'une même séquence et ont été encodées avec le format de date « BP ». L'écart-type lié à la datation est également inscrit dans le code.

Certaines dates représentent les évènements pour lesquels la date est historique. Ces lignes n'ont pas besoin d'une calibration, contrairement aux autres dates provenant de la base de données 14C (Takada, Yamamoto, Ishizuka, & Nakano, 2016) et sont reprises dans le code au format « AD ». Elles sont précédées par la commande *C\_Date* (explicité dans la section « 9.4.4 Éléments du code et choix des commandes »).

Il n'existe qu'une coulée et deux éruptions historiques dans le cas du premier modèle. Il s'agit de la coulée Sd-Tam (800-802 AD), de l'éruption Jogan et de l'éruption Sd-Ken1 (937 AD). Il y a également un tephra marqueur encodé sous le nom « IzKt » (voir annexe I) provenant d'une éruption volcanique d'un autre volcan en 838 AD. Une dernière éruption historique, Hoei (1707 AD), a été ajoutée dans le code complet.

---

<sup>4</sup> Dans le logiciel OxCal, une phase regroupe plusieurs évènements ou paramètres qui appartiennent à la même couche stratigraphique (Bronck, s.d.). Dans ce cas-ci, un élément sera sorti d'une phase s'il n'a pas été échantillonné au niveau d'une strate.



#### 9.4.4 ELÉMENTS DU CODE ET CHOIX DES COMMANDES

Plusieurs commandes ont été utilisées dans le code (annexe II et III) et sont explicitées dans le tableau ci-dessous (Bronck, s.d.) :

Tableau 4 : Commandes utilisées dans le premier modèle simple et 'utilité dans le code (Bronck, s.d.).

Ligne de code	Utilité dans le code
Sequence (« Nom ») {...}	Permet de définir un ordre chronologique pour des évènements ou des groupes d'évènements.
Phase (« Nom ») {...}	Permet de regrouper des évènements entre eux des évènements appartenant à une même couche stratigraphique.
Boundary (« Nom », AD(Année))	Permet de définir les limites chronologiques d'un groupe d'évènements distribués de manière uniforme lorsque la commande est généralement utilisée avec une commande <i>Sequence</i> . Dans ce cas-ci, il y a une <i>Boundary</i> au début et une à la fin du code. Il est possible de définir une date spécifique ou bien de juste nommer la limite.
R_Date (« Nom », 14C Date, Ecart-type)	Permet de calculer la densité de probabilité pour la date calibrée en fonction de la datation au carbone 14 et de la courbe de calibration au carbone 14.
C_Date (« Nom », Cal Date, Ecart-type)	Permet d'introduire un évènement historique qui n'a pas besoin de calibration.
Date ("Nom")	Permet de calculer la date probable d'un évènement ; dans ce cas-ci, d'une éruption.
{color=« nom de la couleur";};	Permet d'obtenir des résultats graphiques en couleur. Ici, la couleur indigo correspond aux dates d'éruption provenant d'une phase, la couleur magenta correspond aux <i>R_Date</i> non intégrées dans des phases et la couleur turquoise correspond aux <i>C_dates</i> (dates historiques).
Span (« Nom de la phase »)	Permet de donner l'étendue temporelle d'une phase, entre les évènements datés.
Interval (« Nom de la phase »)	Permet de calculer l'intervalle entre le début et la fin de la phase.



Plusieurs choix de modélisation ont été posés pour aboutir au modèle chronostratigraphique final. Dans le code, la commande *Phase* a été préférée à la commande *R\_Combine*. En effet, cette dernière ne permet pas de tenir compte de l'endroit (voir colonne 5 du tableau 1 de l'annexe I) où la matière organique a été échantillonnée (au-dessus, en-dessous ou à l'intérieur de la couche) car tout est combiné pour avoir une seule date. Généralement, la commande *R\_Combine* est utilisée quand le matériel organique échantillonné pour la datation a une courte durée de vie (Reuther, Potter, Coffman, Smith, & Bigelow, 2020). Utiliser *R\_Combine* signifie que l'âge du matériel est indistinct de celui de la coulée. Dans le présent travail, la base de données (Takada, Yamamoto, Ishizuka, & Nakano, 2016) ne donne pas suffisamment d'informations sur l'origine du matériel organique daté et sa durée de vie. Le choix d'utiliser la commande *Phase* a été posé ainsi que de considérer que les matériaux datés sont antérieurs à l'éruption. Ils n'ont pas été formés a priori pendant la même année que celle de l'éruption. C'est également pour cette raison que la commande *Date*, pour contraindre l'âge d'une éruption, est placée après la *Phase*. Par exemple, pour l'éruption Sd-Syt, deux échantillons peuvent être trouvés dans la base de données. Comme il n'y a pas de précision sur leur origine, ils sont codés au sein d'une *Phase*. Le modèle d'âge de l'éruption est subséquent à la *Phase*, et donc implémenté après la commande *Phase* via la commande *Date*, comme montré ci-dessous :

```
Phase("SdSyt")
{
  R_Date("Beta-173984 SKYC-1", 1000, 40);
  R_Date("Beta-175083 13-1C", 900, 40);
  Span("SdSyt");
  Interval("SdSyt");
};
Date("EruptionSdSyt")
{
  color="indigo";
};
```

La stratégie déployée dans ce travail s'appuie aussi sur l'étude de Reuther *et al.* (2020), similaire à celle-ci. Ils utilisent le code *R\_Combine* mais précisent que cela va à l'encontre des pratiques statistiques habituelles. Cette commande a tout de même été testée et n'est effectivement pas optimale dans le cas de cette étude car des erreurs de test  $\chi^2$  sont apparues directement. C'est pour ces raisons que la commande *Phase* est préférée.

Dans un cas similaire de modélisation tephrostatigraphique (Davies, Jensen, Froese, & Wallace, 2016), la commande *Tau\_Boundary* a été utilisée (à la place de la fonction *Date*). Cela n'a pas été concluante pour le cas du Mont Fuji. Cependant, selon ces auteurs, cette commande





Tableau 7 : Tableau de sortie d'OxCal pour le modèle complet. Ce tableau comprend les dates modélisées et l'intervalle dans lequel elles sont comprises, un degré de confiance correspondant aux datations modélisées ainsi que l'indice d' « agreement » A et l'indice de convergence C (partie 3).

R_Date Beta-158211 FJM305 KomakadoScoriaFallDeposit	-899	-596	95.4	-900	-775	95.4	84.6	97.5	31	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
EruptionKomakadoSFD				-882	-735	95.4		99.4	32	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
R_Date Beta-159718 FJM309 SdHac	-802	-543	95.4	-806	-671	95.4	116.2	99.2	33	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
EruptionSdHac				-798	-658	95.4		98.5	34	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
▼ Phase ScPfl									35	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
R_Date Beta-171069 FJM430	-805	-544	95.4	-785	-580	95.4	90.4	97.7	36	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
R_Date Beta-159722 FJM313 SdPfl	-805	-544	95.4	-784	-581	95.4	90.4	97.9	37	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
R_Date Beta-159721 FJM312 SdPfl	-792	-486	95.4	-774	-586	95.4	106	97.6	38	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
R_Date Beta-159720 FJM311 SdPfl	-792	-486	95.4	-775	-586	95.4	105.9	97.8	39	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Span ScPfl				7	145	95.4		99.4	148	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Interval ScPfl				35	199	95.4		99.2	149	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
EruptionScPfl				-731	-542	95.4		97.3	40	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
▼ Phase VolcanicDepositVF2									41	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
R_Date Beta-159723 FJM314 VF2	-781	-416	95.4	-689	-503	95.4	112.6	98.7	42	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
R_Date Beta-177221 FJM418 VF2	-769	-418	95.4	-694	-499	95.4	106.8	98.4	43	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Span VDVF2				0	69	95.4		99.8	150	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Interval VDVF2				8	142	95.4		99.4	151	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
▼ Phase ScoriaMSd									44	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
R_Date Beta-163327 1204C-5 ScoriaMSd	-796	-516	95.4	-632	-462	95.4	69	98.6	45	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Tableau 8 : Tableau de sortie d'OxCal pour le modèle complet. Ce tableau comprend les dates modélisées et l'intervalle dans lequel elles sont comprises, un degré de confiance correspondant aux datations modélisées ainsi que l'indice d' « agreement » A et l'indice de convergence C (partie 4).

Span ScoriaMSd				0	92	95.4		99.6	152	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Interval ScoriaMSd				13	170	95.4		99.5	153	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
EruptionScoriaMSd				-567	-418	95.4		99.5	47	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
▼ Phase VF1									48	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
R_Date Beta-163312 FJM330 VF1	-755	-406	95.4	-519	-400	95.4	105.4	99.2	49	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
R_Date Beta-136408 FJM204 VF1	-791	-178	95.4	-524	-349	95.4	128.7	99.3	50	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Span VF1				0	112	95.4		99.6	154	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Interval VF1				49	234	95.4		99.3	155	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
R_Date Beta-15271 5 1129C-2 SdKng	-387	-177	95.4	-395	-291	95.4	89.1	99.5	51	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
▼ Phase SdKng									52	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
R_Date Beta-185825 FJM425 SdKng	-387	-177	95.4	-377	-240	95.4	102.9	99.1	53	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
R_Date Beta-177223 FJM420 SdKng	-386	-156	95.4	-375	-239	95.4	110.3	99.4	54	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Span SdKng				0	78	95.4		99.8	156	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Interval SdKng				16	152	95.4		99.6	157	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
EruptionSdKng				-346	-204	95.4		99.1	55	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
R_Date Beta-185826 FJM426 VF2	-382	-116	95.4	-320	-180	95.4	102.2	99.4	56	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
R_Date Beta-199178 FJ-56-1 SdTsm	-387	-177	95.4	-297	-162	95.4	93.9	99.3	57	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
EruptionSdTsm				-256	-88	95.4		99.6	58	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
R_Date Beta-173158 021114C-2 SdKtg	-351	1	95.4	-198	-56	95.4	115.1	99.3	59	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>



Tableau 9 : Tableau de sortie d'OxCal pour le modèle complet. Ce tableau comprend les dates modélisées et l'intervalle dans lequel elles sont comprises, un degré de confiance correspondant aux datations modélisées ainsi que l'indice d' « agreement » A et l'indice de convergence C (partie 5).

EruptionSdKtg				-180	11	95.4			99.4	<input checked="" type="checkbox"/>	60	<input type="checkbox"/>
EruptionSdFtz				-141	60	95.4			99.4	<input checked="" type="checkbox"/>	61	<input type="checkbox"/>
R_Date Beta-155449 FJM402 SdFtz	-169	61	95.4	-86	112	95.4		89.5	98.5	<input checked="" type="checkbox"/>	62	<input type="checkbox"/>
R_Date Beta-167659 FJM401 Suba-umag Scoria	81	324	95.4	62	216	95.4		80.6	98.1	<input checked="" type="checkbox"/>	63	<input type="checkbox"/>
EruptionSubaUmaScorie				90	240	95.4			99.3	<input checked="" type="checkbox"/>	64	<input type="checkbox"/>
R_Date Beta-212494 05112701C S-24-4 SFD	120	334	95.4	130	255	95.4		116.3	99.4	<input checked="" type="checkbox"/>	65	<input type="checkbox"/>
EruptionS244SFD				163	312	95.4			99.5	<input checked="" type="checkbox"/>	66	<input type="checkbox"/>
▼ Phase SdTpf										<input checked="" type="checkbox"/>	67	<input type="checkbox"/>
R_Date Beta-184535 031011-6 SdTpf	126	346	95.4	208	361	95.4		104.5	99	<input checked="" type="checkbox"/>	68	<input type="checkbox"/>
R_Date Beta-185894 03110304C-2 SdTpf	31	420	95.4	216	405	95.4		114.3	98.9	<input checked="" type="checkbox"/>	69	<input type="checkbox"/>
R_Date Beta-270704 05112407C SdTpf	247	425	95.4	251	414	95.4		101.1	99.3	<input checked="" type="checkbox"/>	70	<input type="checkbox"/>
R_Date Beta-169922 FJM413SdTpf	247	529	95.4	252	417	95.4		101.7	98.7	<input checked="" type="checkbox"/>	71	<input type="checkbox"/>
Span SdTpf				25	177	95.4			99.5	<input checked="" type="checkbox"/>	158	<input type="checkbox"/>
Interval SdTpf				74	254	95.4			99.4	<input checked="" type="checkbox"/>	159	<input type="checkbox"/>
EruptionSdTpf				334	462	95.4			99.5	<input checked="" type="checkbox"/>	72	<input type="checkbox"/>
R_Date Beta-199176 041127C-1 Sdlnm	406	565	95.4	382	485	95.4		93.2	99.3	<input checked="" type="checkbox"/>	73	<input type="checkbox"/>
EruptionSdlnm				406	509	95.4			99.5	<input checked="" type="checkbox"/>	74	<input type="checkbox"/>
R_Date Beta-147685 FJM301 SdAos	418	577	95.4	424	522	95.4		110.5	99.3	<input checked="" type="checkbox"/>	75	<input type="checkbox"/>
EruptionSdAos				436	542	95.4			99.2	<input checked="" type="checkbox"/>	76	<input type="checkbox"/>

Tableau 10 : Tableau de sortie d'OxCal pour le modèle complet. Ce tableau comprend les dates modélisées et l'intervalle dans lequel elles sont comprises, un degré de confiance correspondant aux datations modélisées ainsi que l'indice d' « agreement » A et l'indice de convergence C (partie 6).

R_Date Beta-136403 FJM104 SdAos	363	641	95.4	450	556	95.4		121.8	99.2	<input checked="" type="checkbox"/>	77	<input type="checkbox"/>
▼ Phase SdGam										<input checked="" type="checkbox"/>	78	<input type="checkbox"/>
R_Date Beta-188845 FJ-51-2 SdGam	266	601	95.4	470	578	95.4		107.8	99.3	<input checked="" type="checkbox"/>	79	<input type="checkbox"/>
R_Date Beta-188844 FJ-51-1 SdGam	433	639	95.4	475	585	95.4		97.7	98.6	<input checked="" type="checkbox"/>	80	<input type="checkbox"/>
EruptionSdGam				496	605	95.4			98.5	<input checked="" type="checkbox"/>	81	<input type="checkbox"/>
EruptionSdHnm				520	625	95.4			98.8	<input checked="" type="checkbox"/>	82	<input type="checkbox"/>
R_Date Beta-184537 031014-3 SdHnm	435	644	95.4	546	635	95.4		121.2	99.3	<input checked="" type="checkbox"/>	83	<input type="checkbox"/>
▼ Phase SdYak										<input checked="" type="checkbox"/>	84	<input type="checkbox"/>
R_Date Beta-1 59724 FJM315	428	601	95.4	561	645	95.4		52.8	98.7	<input checked="" type="checkbox"/>	85	<input type="checkbox"/>
				Warning! Poor agreement - A= 52.8%(Ac= 60.0%)								
R_Date Beta-1 63314 011014-5	612	775	95.4	609	705	95.4		116.5	98.8	<input checked="" type="checkbox"/>	86	<input type="checkbox"/>
R_Date Beta-161264 FJM320	646	777	95.4	646	706	95.4		108.8	98.8	<input checked="" type="checkbox"/>	87	<input type="checkbox"/>
R_Date Beta-159725 FJM316	671	880	95.4	660	712	95.4		84.1	97.3	<input checked="" type="checkbox"/>	88	<input type="checkbox"/>
R_Date Beta-1 59726 FJM317	674	884	95.4	661	714	95.4		70.1	98.2	<input checked="" type="checkbox"/>	89	<input type="checkbox"/>
Span SdYak				38	137	95.4			97.3	<input checked="" type="checkbox"/>	160	<input type="checkbox"/>
Interval SdYak				57	162	95.4			97.7	<input checked="" type="checkbox"/>	161	<input type="checkbox"/>
EruptionSdYak				674	725	95.4			96.5	<input checked="" type="checkbox"/>	90	<input type="checkbox"/>
R_Date Beta-1 69924 FJM415	652	821	95.4	679	733	95.4		97.9	96.8	<input checked="" type="checkbox"/>	91	<input type="checkbox"/>
R_Date SdOnw1	657	873	95.4	685	740	95.4		117.5	97	<input checked="" type="checkbox"/>	92	<input type="checkbox"/>





Tableau 13 : Tableau de sortie d'OxCal pour le modèle complet. Ce tableau comprend les dates modélisées et l'intervalle dans lequel elles sont comprises, un degré de confiance correspondant aux datations modélisées ainsi que l'indice d' « agreement » A et l'indice de convergence C (partie 9).

EruptionSdObu				878	913	95.4				99.2	<input checked="" type="checkbox"/>	122	<input type="checkbox"/>
R_Date SubashinguchiUmagaeshiSFD	773	1014	95.4	884	917	95.4		117		99.2	<input checked="" type="checkbox"/>	123	<input type="checkbox"/>
EruptionSubaUma				890	920	95.4				99.2	<input checked="" type="checkbox"/>	124	<input type="checkbox"/>
R_Date SdFud	897	1157	95.4	896	923	95.4		21.8		99.2	<input checked="" type="checkbox"/>	125	<input type="checkbox"/>
Warning! Poor agreement - A= 21.8%(Ac= 60.0%)													
EruptionSdFud				900	929	95.4				99.1	<input checked="" type="checkbox"/>	126	<input type="checkbox"/>
R_Date SdNis	889	1120	95.4	904	933	95.4		49.3		99	<input checked="" type="checkbox"/>	127	<input type="checkbox"/>
Warning! Poor agreement - A= 49.3%(Ac= 60.0%)													
EruptionSdNis				911	937	95.4				99.1	<input checked="" type="checkbox"/>	128	<input type="checkbox"/>
EruptionSdKen2				919	941	95.4				99.7	<input checked="" type="checkbox"/>	129	<input type="checkbox"/>
C_Date SdKen1	937	938	95.4	937	938	95.4		100		100	<input checked="" type="checkbox"/>	130	<input type="checkbox"/>
R_Date Beta-199182 FJ-59-1 Sd San	992	1158	95.4	950	1047	95.4		73.5		98.9	<input checked="" type="checkbox"/>	131	<input type="checkbox"/>
EruptionSdSan				971	1091	95.4				99.2	<input checked="" type="checkbox"/>	132	<input type="checkbox"/>
▼ Phase SdSub2											<input checked="" type="checkbox"/>	133	<input type="checkbox"/>
R_Date Beta-185893 03110202c	895	1154	95.4	992	1130	95.4		96.9		98.5	<input checked="" type="checkbox"/>	134	<input type="checkbox"/>
R_Date Beta-211840 051128c-1	989	1160	95.4	997	1125	95.4		112.3		99.3	<input checked="" type="checkbox"/>	135	<input type="checkbox"/>
Span SdSub2				0	77	95.4				99.8	<input checked="" type="checkbox"/>	170	<input type="checkbox"/>
Interval SdSub2				11	132	95.4				99.5	<input checked="" type="checkbox"/>	171	<input type="checkbox"/>
EruptionSdSub2				1024	1151	95.4				99.6	<input checked="" type="checkbox"/>	136	<input type="checkbox"/>

Tableau 14 : Tableau de sortie d'OxCal pour le modèle complet. Ce tableau comprend les dates modélisées et l'intervalle dans lequel elles sont comprises, un degré de confiance correspondant aux datations modélisées ainsi que l'indice d' « agreement » A et l'indice de convergence C (partie 10).

▼ Phase SdSyt											<input checked="" type="checkbox"/>	137	<input type="checkbox"/>
R_Date Beta-173984 SKYC-1	989	1160	95.4	1036	1200	95.4		75.6		98.4	<input checked="" type="checkbox"/>	138	<input type="checkbox"/>
R_Date Beta-175083 13-1C	1038	1220	95.4	1056	1224	95.4		101.4		98.9	<input checked="" type="checkbox"/>	139	<input type="checkbox"/>
Span SdSyt				0	113	95.4				99.3	<input checked="" type="checkbox"/>	172	<input type="checkbox"/>
Interval SdSyt				67	622	95.4				98.3	<input checked="" type="checkbox"/>	173	<input type="checkbox"/>
EruptionSdSyt				1185	1709	95.4				98.1	<input checked="" type="checkbox"/>	140	<input type="checkbox"/>
C_Date EruptionHoei	1707	1708	95.4	1707	1708	95.4		100		100	<input checked="" type="checkbox"/>	141	<input type="checkbox"/>
▼ Boundary top	1800	1801	95.4	1800	1801	95.4		100		100	<input checked="" type="checkbox"/>	142	<input type="checkbox"/>
1800.5											<input checked="" type="checkbox"/>	143	<input type="checkbox"/>

Le tableau de sortie du logiciel OxCal ci-dessus donne plusieurs types d'informations détaillés ci-dessous. La première colonne appelée « Unmodelled » reprend la fourchette de dates à laquelle un échantillon appartient après la calibration (représenté en gris clair sur le « Multiple plot » ci-après). L'ordre stratigraphique n'est pas encore pris en compte. La colonne « from » donne la date la plus jeune de cet intervalle, alors que la colonne « to » renseigne la date la plus ancienne à laquelle l'échantillon est daté. Une troisième colonne reprend le pourcentage de confiance. Par exemple, le premier échantillon de la phase Sd-Syt est daté entre 989 et 1160 AD avec un degré de confiance à 95,4% après calibration et sans tenir compte de l'ordre stratigraphique, et donc, des autres éléments entrés dans le code.

La deuxième colonne appelée « Modelled » reprend les mêmes informations que dans la colonne « Unmodelled » mais en tenant compte de l'ordre stratigraphique. Cette dernière est représentée en gris foncé sur le « Multiple plot » ci-après. Ainsi, le premier échantillon de la phase Sd-Syt est daté entre 1036 et 1200 AD avec un degré de confiance à 95,4% après calibration et en tenant compte de l'ordre stratigraphique suggéré dans le modèle. Les dates



entrées avec une commande *C\_Date* donnent les mêmes résultats dans les colonnes « Unmodelled » et « Modelled ». Puisque ce sont des données historiques, la calibration n'est pas nécessaire et seule l'année pendant laquelle l'évènement s'est produit apparaît dans les résultats.

Les résultats informent qu'il y a un problème de vraisemblance via les « agreement indices ». Ici, le « Individual agreement Indice », noté A, est mis en évidence. Cet indice, lorsqu'il est inférieur à 60%, est utile pour identifier les échantillons qui ne correspondent pas ou peu au modèle proposé. Dans ce cas de figure, l'indice est inférieur à 60% pour les 4 éléments notés (sur la colonne à l'extrême droite) 85, 118, 125 et 127. L'indice de convergence C est utilisé pour savoir si les éléments du code ont une distribution représentative. Normalement, cet indice doit être supérieur à 95%, ce qui est le cas ici pour tous les éléments du code. La décision de garder les éléments avec peu de vraisemblance avant de continuer la suite du code a été prise, notamment car l'indice C ne présente pas de problème et l'indice A est proche de 60% pour les éléments aux lignes 85 et 127. De plus, l'ordre stratigraphique sans les éléments des lignes 117 et 125 semble donner lieu à encore plus de problèmes de vraisemblance. Il semblerait que le problème provienne plutôt de l'ordre stratigraphique suggéré dans la base de données (Takada, Yamamoto, Ishizuka, & Nakano, 2016).

Le code reprend les commandes *Span* et *Interval* qui sont liées aux *Phases*. *Interval* renseigne la durée d'une phase et comprend des éléments qui ne sont pas forcément datés ni présents dans le code, alors que *Span* renseigne la longueur d'une phase de son début à sa fin. Les résultats de ces deux commandes sont donnés sous forme de durée minimum dans la colonne « from » et de durée maximum dans la colonne « to » et sont également associés à un degré de confiance exprimé en pourcentage. Ces commandes sont particulièrement utiles pour une éventuelle réévaluation future des datations. En effet, plus la phase dure et son intervalle est grand, plus les incertitudes sont importantes. De manière stratégique, il sera plus intéressant de réévaluer en premier lieu les datations des phases pour lesquelles l'intervalle est grand.

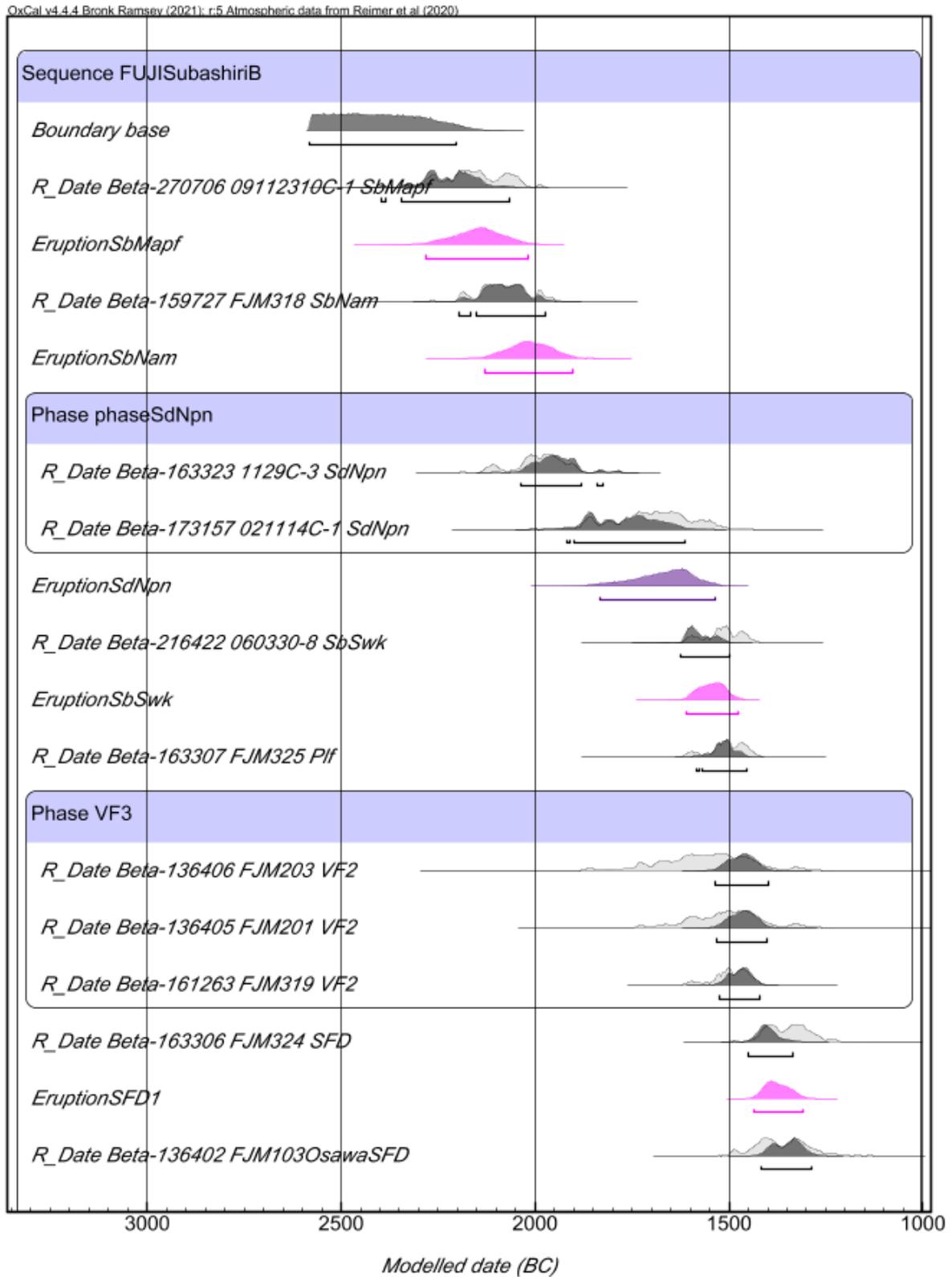


Figure 12 : Multiple plot sorti d'OxCal pour le modèle complet. Ce graphique reprend tous les échantillons entrés dans OxCal pour créer le modèle statistique ainsi que les dates d'éruption calculées. Les échantillons sont associés avec leur densité de probabilité avant et après modélisation (partie 1).

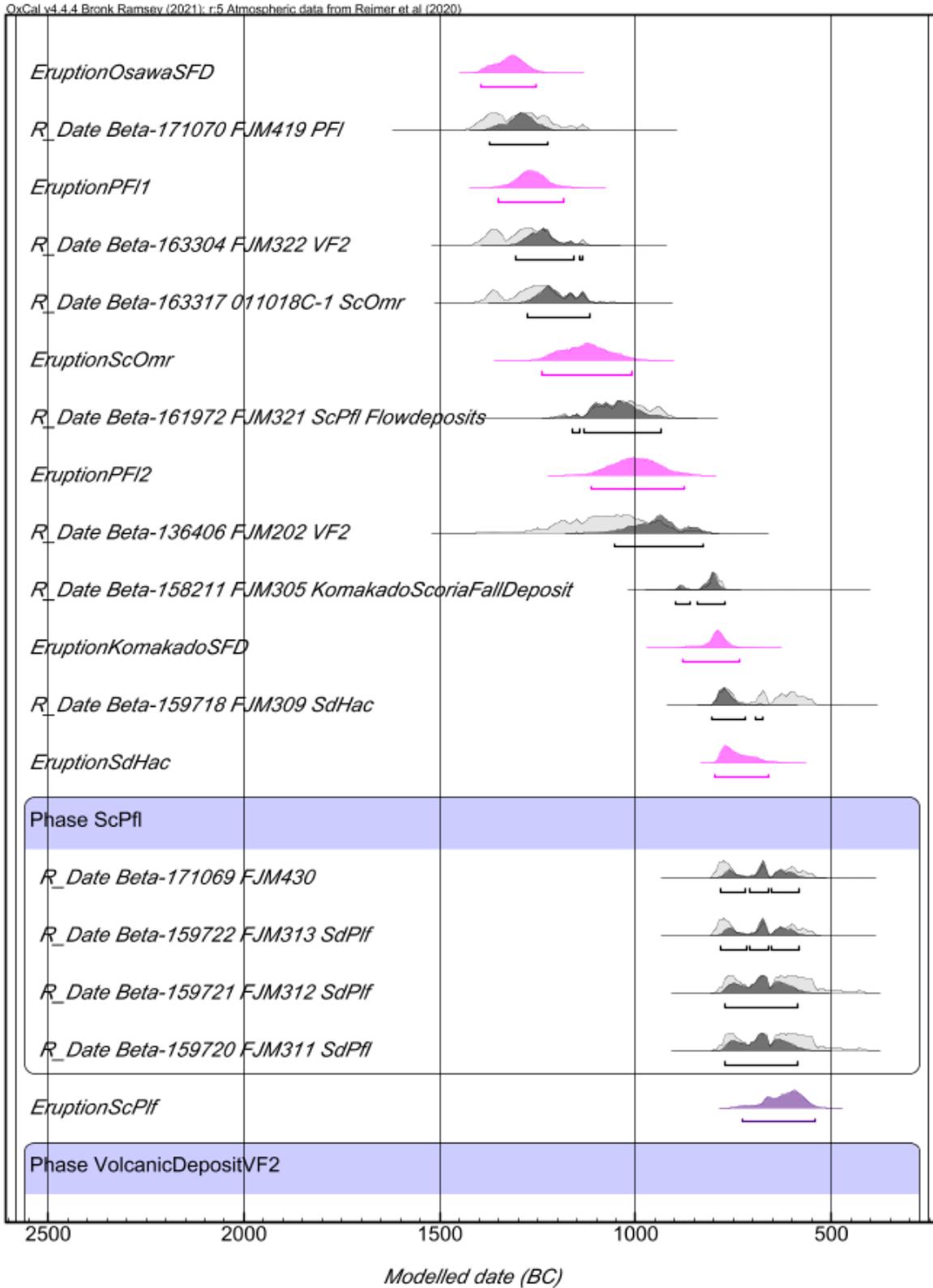


Figure 13 : Multiple plot sorti d'OxCal pour le modèle complet. Ce graphique reprend tous les échantillons entrés dans OxCal pour créer le modèle statistique ainsi que les dates d'éruption calculées. Les échantillons sont associés avec leur densité de probabilité avant et après modélisation (partie 2).

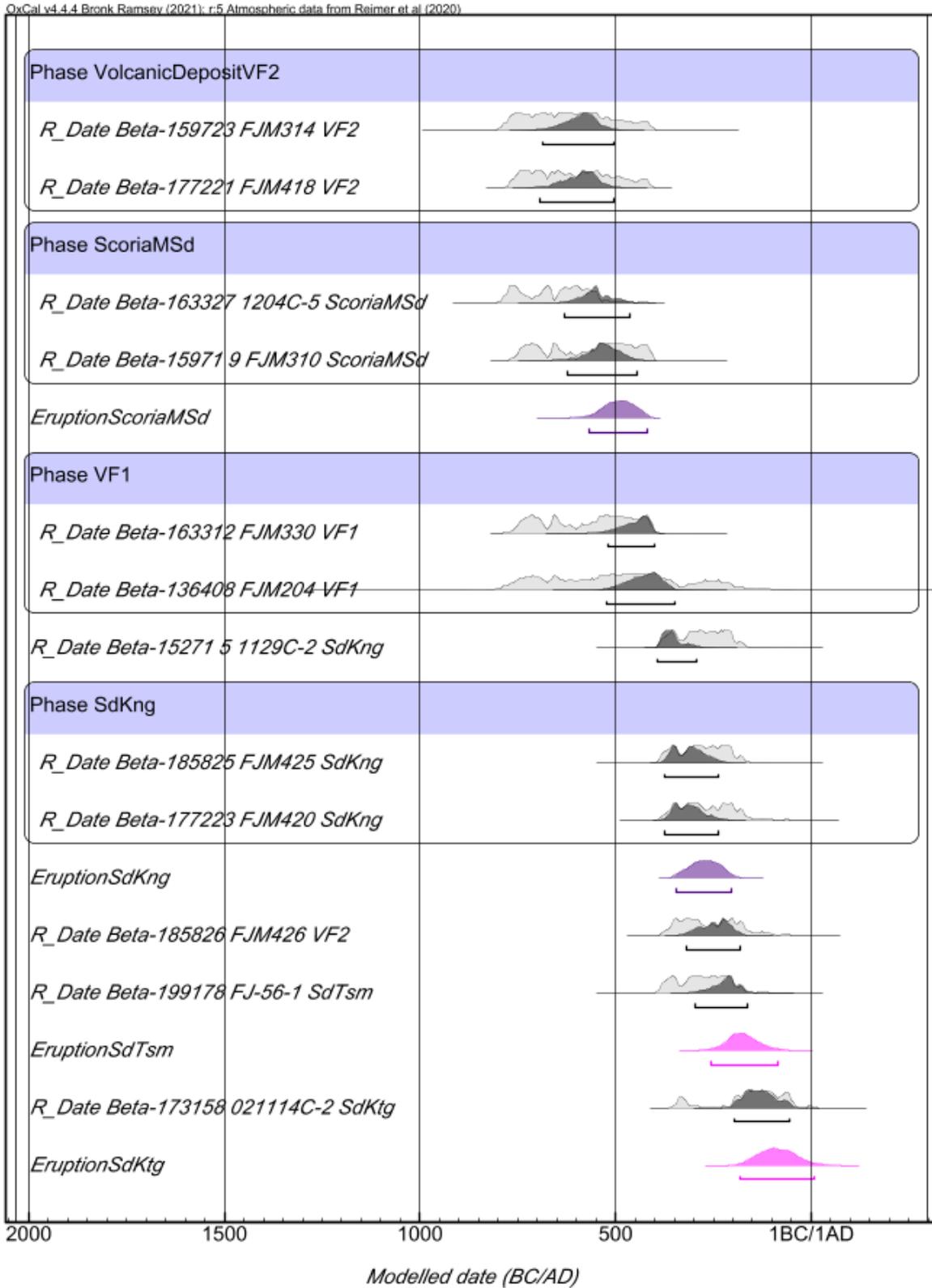


Figure 14 : Multiple plot sorti d'OxCal pour le modèle complet. Ce graphique reprend tous les échantillons entrés dans OxCal pour créer le modèle statistique ainsi que les dates d'éruption calculées. Les échantillons sont associés avec leur densité de probabilité avant et après modélisation (partie 3).

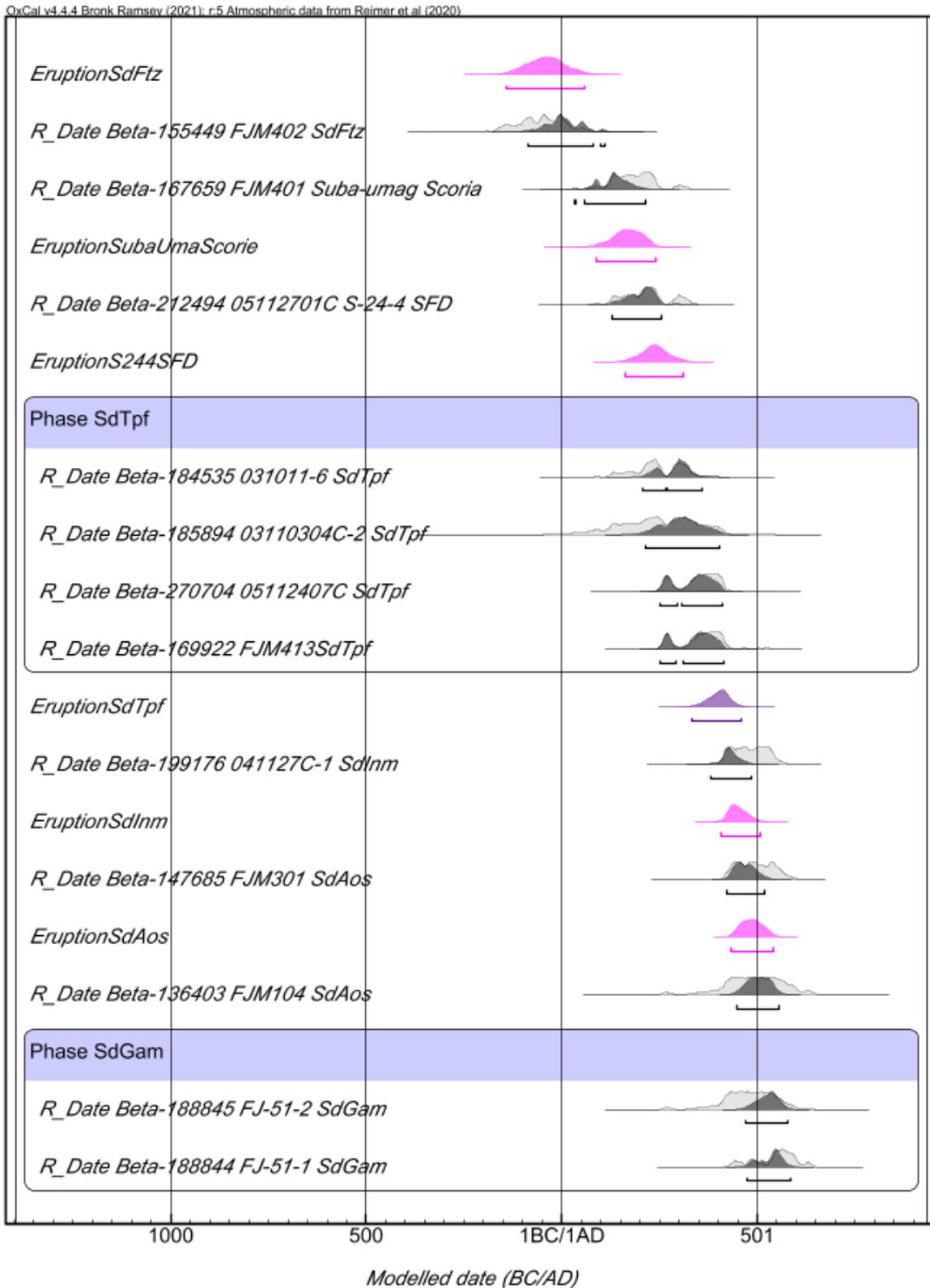


Figure 15 : Multiple plot sorti d'OxCal pour le modèle complet. Ce graphique reprend tous les échantillons entrés dans OxCal pour créer le modèle statistique ainsi que les dates d'éruption calculées. Les échantillons sont associés avec leur densité de probabilité avant et après modélisation (partie 4).



Figure 16 : Multiple plot sorti d'OxCal pour le modèle complet. Ce graphique reprend tous les échantillons entrés dans OxCal pour créer le modèle statistique ainsi que les dates d'éruption calculées. Les échantillons sont associés avec leur densité de probabilité avant et après modélisation (partie 5).

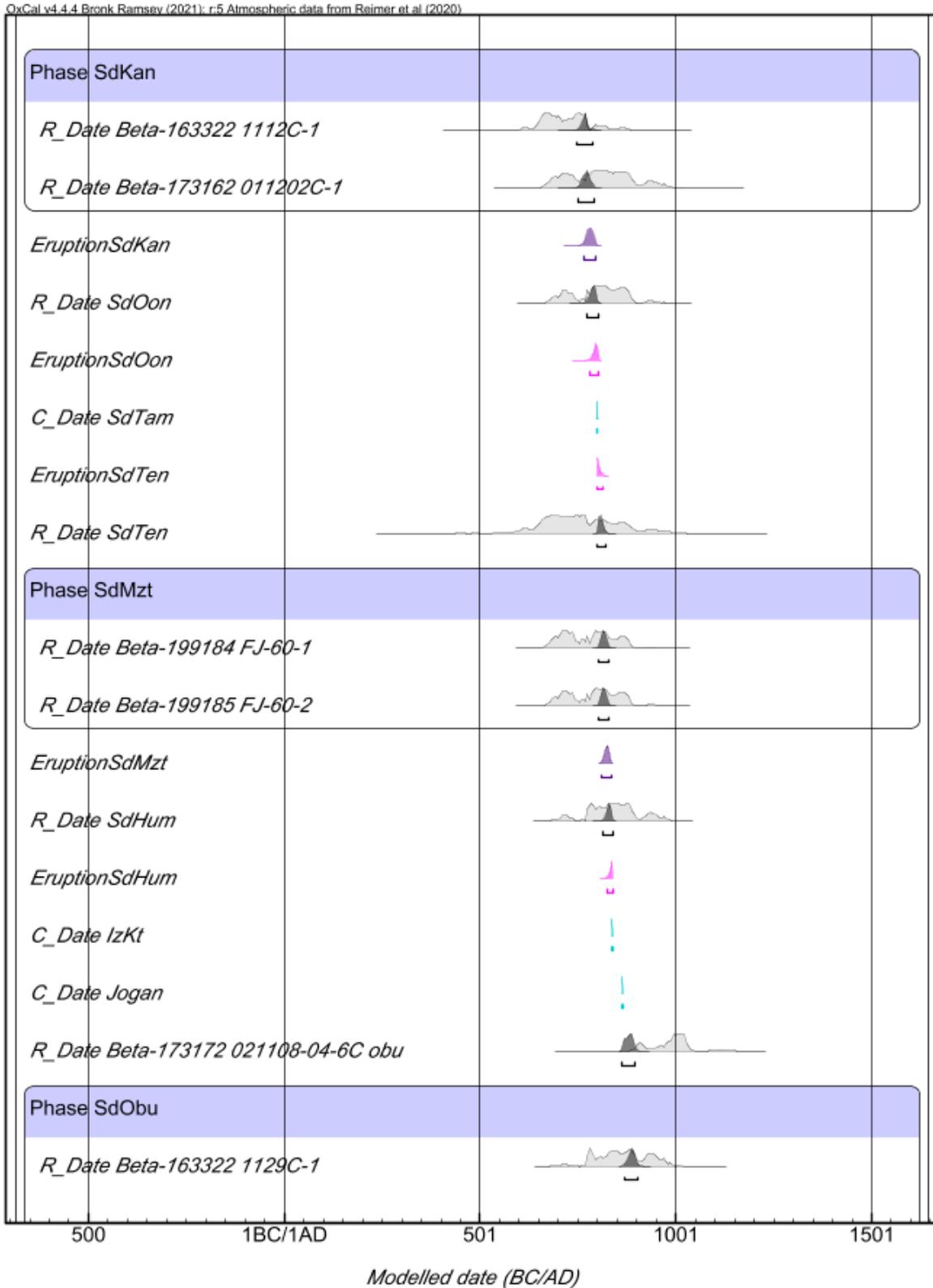


Figure 17 : Multiple plot sorti d'OxCal pour le modèle complet. Ce graphique reprend tous les échantillons entrés dans OxCal pour créer le modèle statistique ainsi que les dates d'éruption calculées. Les échantillons sont associés avec leur densité de probabilité avant et après modélisation (partie 6).

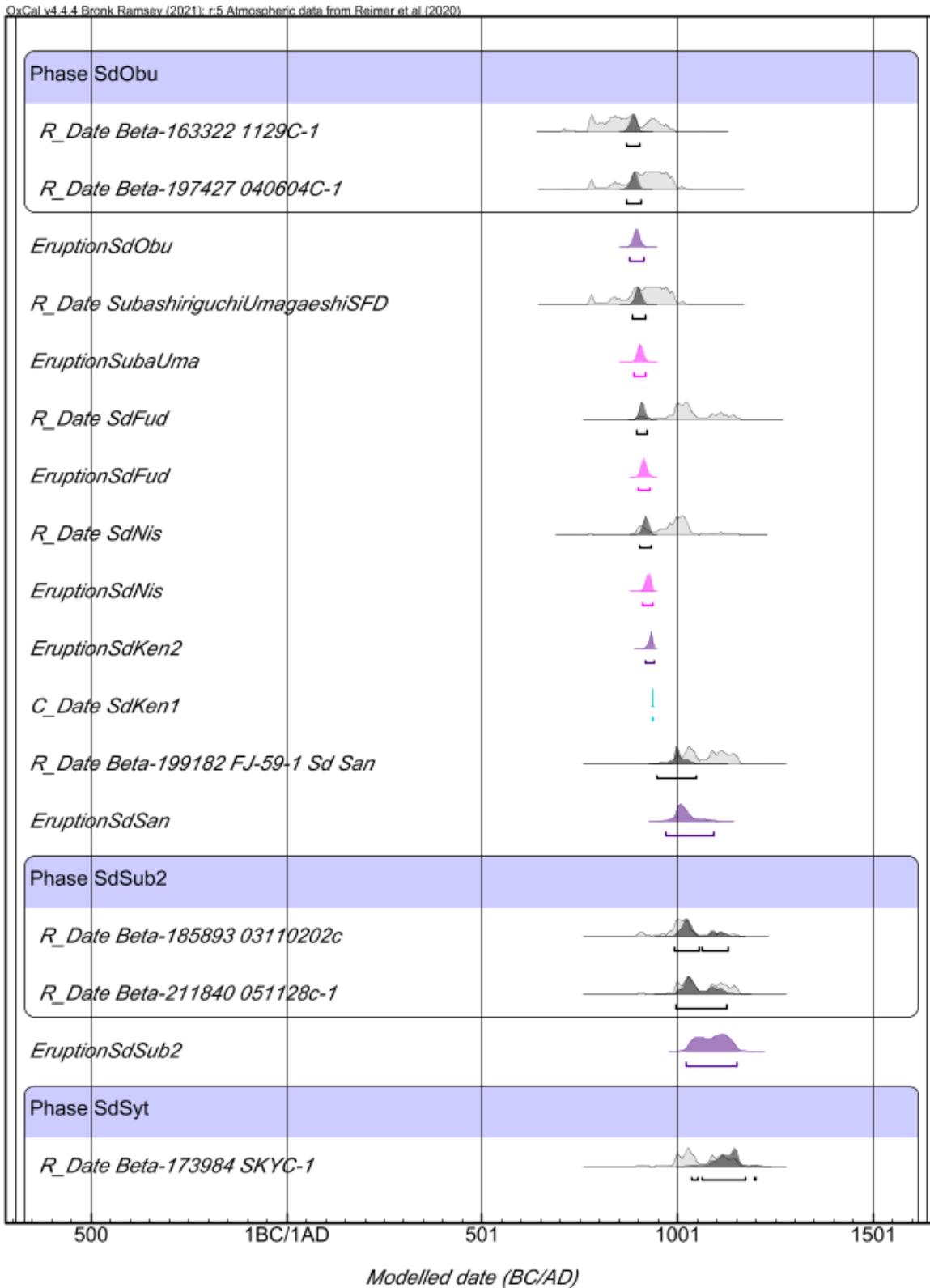


Figure 18 : Multiple plot sorti d'OxCal pour le modèle complet. Ce graphique reprend tous les échantillons entrés dans OxCal pour créer le modèle statistique ainsi que les dates d'éruption calculées. Les échantillons sont associés avec leur densité de probabilité avant et après modélisation (partie 7).

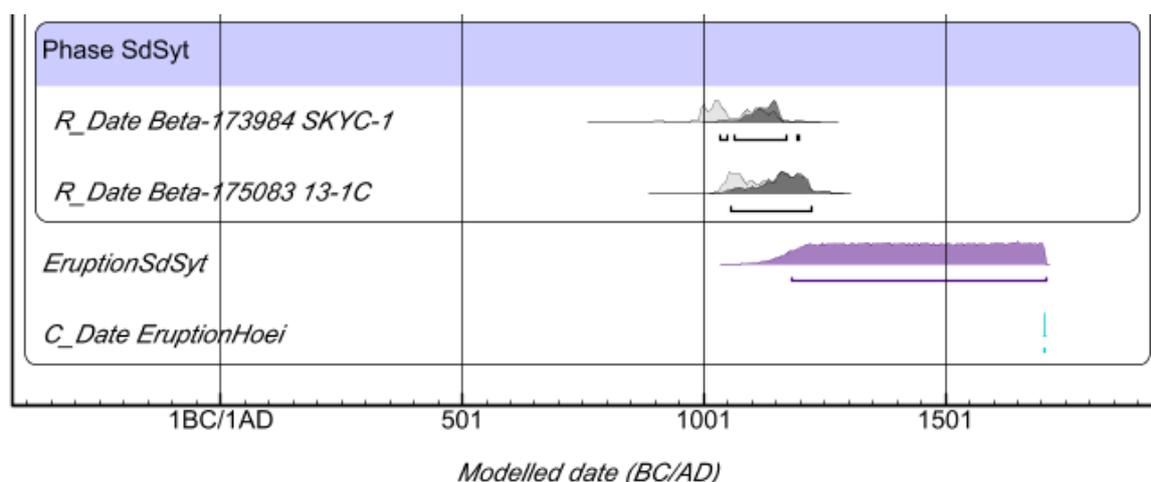


Figure 19 : Multiple plot sorti d'OxCal pour le modèle complet. Ce graphique reprend tous les échantillons entrés dans OxCal pour créer le modèle statistique ainsi que les dates d'éruption calculées. Les échantillons sont associés avec leur densité de probabilité avant et après modélisation (partie 8).

Sur le Multiple plot, la couleur indigo correspond à l'âge modélisé d'une éruption après une phase comprenant toutes les datations associées à ces produits éruptifs dans la base de données. La couleur magenta correspond à l'âge modélisé d'une éruption non précédée par des datations intégrées dans une phase. La couleur turquoise correspond aux *C\_date* (dates historiques).

Le type de graphique ci-dessus (figures 8 à 14) donne une représentation visuelle des résultats du modèle montrant les densités de probabilité avant (pour les datations carbone 14) et après la modélisation (pour les datations et l'âge des éruptions). La densité de probabilité de la simple calibration avec la datation au carbone 14 est représentée en gris clair. Le modèle d'âge déterminé pour l'échantillon avec les contraintes stratigraphiques imposées par le logiciel est indiqué en gris foncé. Pour la plupart des dates, la contrainte a été forte et a réduit l'intervalle d'âge possible.

Pour certaines dates comme celles de la phase Sd-Syt, les intervalles modélisés sont larges. La figure suivante, le « Single plot » (figure 20), qui comprend uniquement les échantillons ayant eu besoin d'une calibration, illustre cette problématique. Celle-ci montre où les échantillons utilisés se situent sur la courbe de calibration IntCal20 ainsi que les densités de probabilité avant (en gris clair) et après calibration (en gris foncé). La teneur de l'atmosphère en radiocarbone varie au cours du temps et est représentée par cette courbe de calibration (CIRAM - Science for Art and Cultural Heritage, 2010). Lorsque les échantillons datent d'une époque correspondant à un « palier » de concentration en radiocarbone sur la courbe de



calibration du carbone 14, le logiciel modélise donc un intervalle d'âge plus large. Lorsque les échantillons datent d'une période où la courbe a une pente plus abrupte, l'intervalle d'âge modélisé se réduit.

Sur un autre exemple illustré par le graphique 5 ci-dessous, la densité de probabilité avant calibration est fortement réduite après la calibration des échantillons entourés en rouge. Cela est dû à la combinaison des informations stratigraphiques ainsi qu'à la courbe de calibration qui est très abrupte à cet endroit du graphique. Cela permet une définition plus précise de la datation de l'échantillon. Le cas contraire est illustré sur le graphique 6 montrant les échantillons calibrés de l'éruption Sd-Syt. Dans ce cas précis, la combinaison des informations stratigraphiques et de datation au carbone 14 n'est pas suffisante pour une définition précise de l'intervalle de datation pour l'éruption Sd-Syt, modélisée entre 1036 et 1200 AD. Les datations utilisées pour calculer l'âge de l'éruption se trouvent aux alentours d'un palier de concentration en radiocarbone (entouré en rouge).

Pour obtenir la figure 20 et faciliter la visualisation, une date calibrée par éruption a été sélectionnée. Si une éruption était liée à plusieurs datations, la date la plus récente a été gardée. De plus, un zoom a été appliqué sur les éruptions les plus récentes : ce graphique ne comprend pas l'entièreté des éruptions. La figure 20 est similaire à la figure 21 mais représente une fenêtre plus restreinte dans le temps, il y a donc moins d'éruptions représentées. Enfin, la figure 22 ne montre que les échantillons calibrés de l'éruption Sd-Syt.

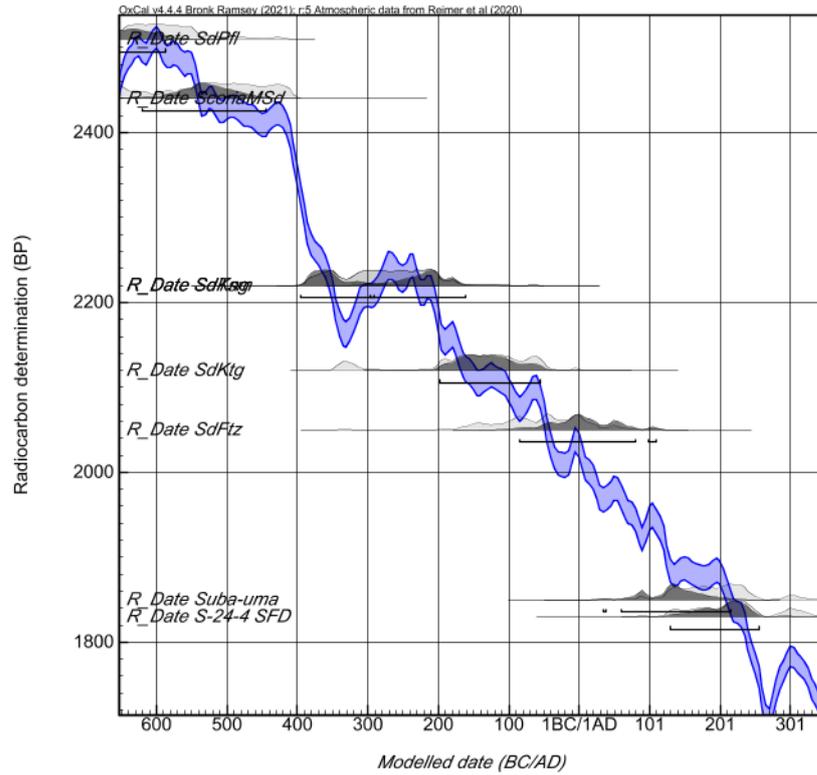


Figure 20 : Single Curve sorti d'OxCal (courbe de calibration IntCal20). Ce graphique ne comprend pas toutes les éruptions pour une question de visibilité. Il comprend une date calibrée par éruption, car il n'y a que les échantillons calibrés qui peuvent être repris sur ce type de graphique.

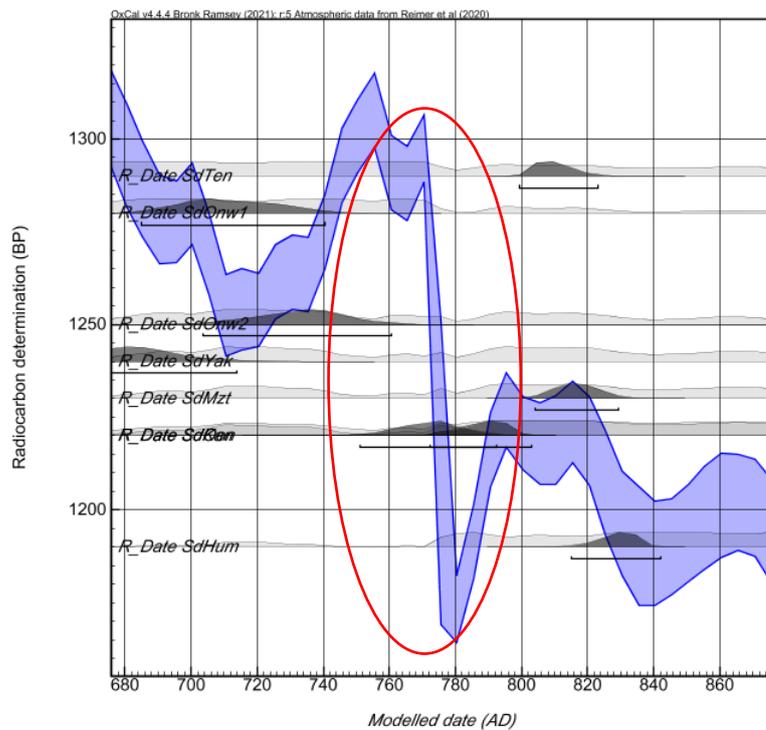


Figure 21 : Single Curve sorti d'OxCal (courbe de calibration IntCal20). Ce graphique comprend une date calibrée par éruption. Zoom sur des éruptions pour lesquelles la calibration a fortement réduit l'intervalle de datation.

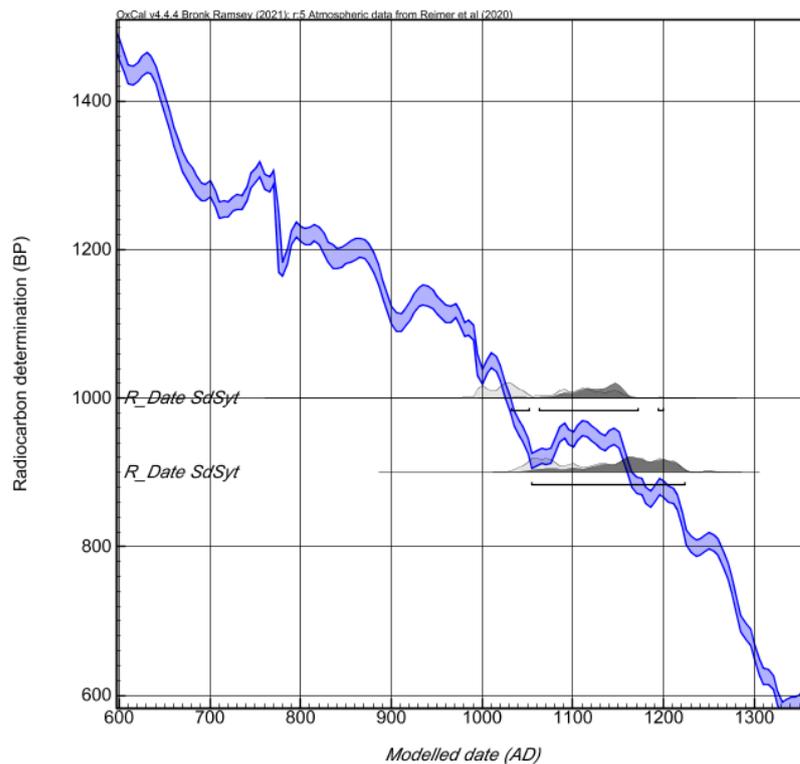


Figure 22 : Single Curve sorti d'OxCal (courbe de calibration IntCal20). Ce graphique comprend uniquement les échantillons calibrés de l'éruption Sd-Syt.

## 10.2 RÉCAPITULATIF DES RÉSULTATS OBTENUS POUR LES ÉRUPTIONS

L'objectif principal de ce travail est d'améliorer la chronostratigraphie du Mont Fuji pour, in fine, calculer la récurrence et participer à une meilleure gestion du risque volcanique. Dans le modèle OxCal final complexe, 45 éruptions ont été modélisées pendant les périodes Subashiri-b et Subashiri-c entre -2284 BC et 1708 AD. Seulement 4 d'entre elles sont des éruptions historiques. En plus des tableaux obtenus avec OxCal, il semble nécessaire de réaliser un récapitulatif plus visuel des résultats les plus intéressants par rapport à l'objectif principal. Le tableau 15 reprend les dates des éruptions modélisées (de la colonne « Modelled » du tableau de sortie d'OxCal) puis la représentation graphique des densités de probabilité de toutes les éruptions incluses ci-dessous.



Tableau 15 : Tableau récapitulatif de la modélisation des âges des éruptions du Mont Fuji ayant eu lieu pendant les périodes Subashiri-b et Subashiri-c. L'intervalle d'âge associé à chaque éruption se trouve dans la colonne 4 du tableau.

<b>Nom de l'éruption</b>	<b>Date de début (BC)</b>	<b>Date de fin (AD)</b>	<b>Intervalle en années</b>
<b>Sb-Mapf</b>	-2284	-2019	265
<b>Sb-Nam</b>	-2130	-1903	227
<b>Sd-Npn</b>	-1837	-1536	301
<b>Sb-Swk</b>	-1609	-1479	128
<b>SFD1</b>	-1434	-1310	24
<b>OsawaSFD</b>	-1399	-1253	215
<b>PFI1</b>	-1351	-1182	168
<b>Sc-Omr</b>	-1242	-1014	230
<b>PFI2</b>	-1115	-875	235
<b>KomakadoSFD</b>	-882	-735	149
<b>Sd-Hac</b>	-798	-658	140
<b>Sc-PIF</b>	-731	-542	189
<b>ScoriaMSd</b>	-567	-418	150
<b>Sd-Kng</b>	-346	-204	142
<b>Sd-Tsm</b>	-256	-88	167
<b>Sd-Ktg</b>	-180	11	188
<b>Sd-Ftz</b>	-141	60	200
<b>SubaUmaScorie</b>	90	240	150
<b>S-24-4</b>	163	312	151
<b>Sd-Tpf</b>	334	462	130
<b>Sd-Inm</b>	406	509	103
<b>Sd-Aos</b>	436	542	104
<b>Sd-Gam</b>	496	605	108
<b>Sd-Hnm</b>	520	625	104
<b>Sd-Yak</b>	674	725	51
<b>Sd-Onw1</b>	691	747	55
<b>Sd-Onw2</b>	722	769	47
<b>Sd-Kri</b>	739	779	42
<b>Sd-Kan</b>	764	797	34



<b>Sd-Oon</b>	781	803	22
<b>Sd-Tam</b>	800	801	1
<b>Sd-Ten</b>	799	813	14
<b>Sd-Mzt</b>	812	835	23
<b>Sd-Hum</b>	824	839	15
<b>Jogan</b>	864	865	1
<b>Sd-Obu</b>	878	913	53
<b>Subashiriguchi-Umagaeshi</b>	890	920	40
<b>Sd-Fud</b>	900	929	29
<b>Sd-Nis</b>	911	937	33
<b>Sd-Ken2</b>	919	937	23
<b>Sd-Ken1</b>	937	938	1
<b>Sd-San</b>	971	1091	154
<b>Sd-Sub2</b>	1024	1151	128
<b>Sd-Syt</b>	1185	1709	528
<b>Hoei</b>	1707	1708	1

Il est important de rappeler que les dates de début et de fin ne représentent pas l'entièreté de la durée de l'évènement, mais un intervalle de temps pendant lequel il est très probable (à plus de 95%) que l'évènement se soit produit. Le nombre d'années compris dans cet intervalle est renseigné dans la colonne 4 du tableau 15. Les évènements historiques sont ceux qui ont un intervalle d'un an.

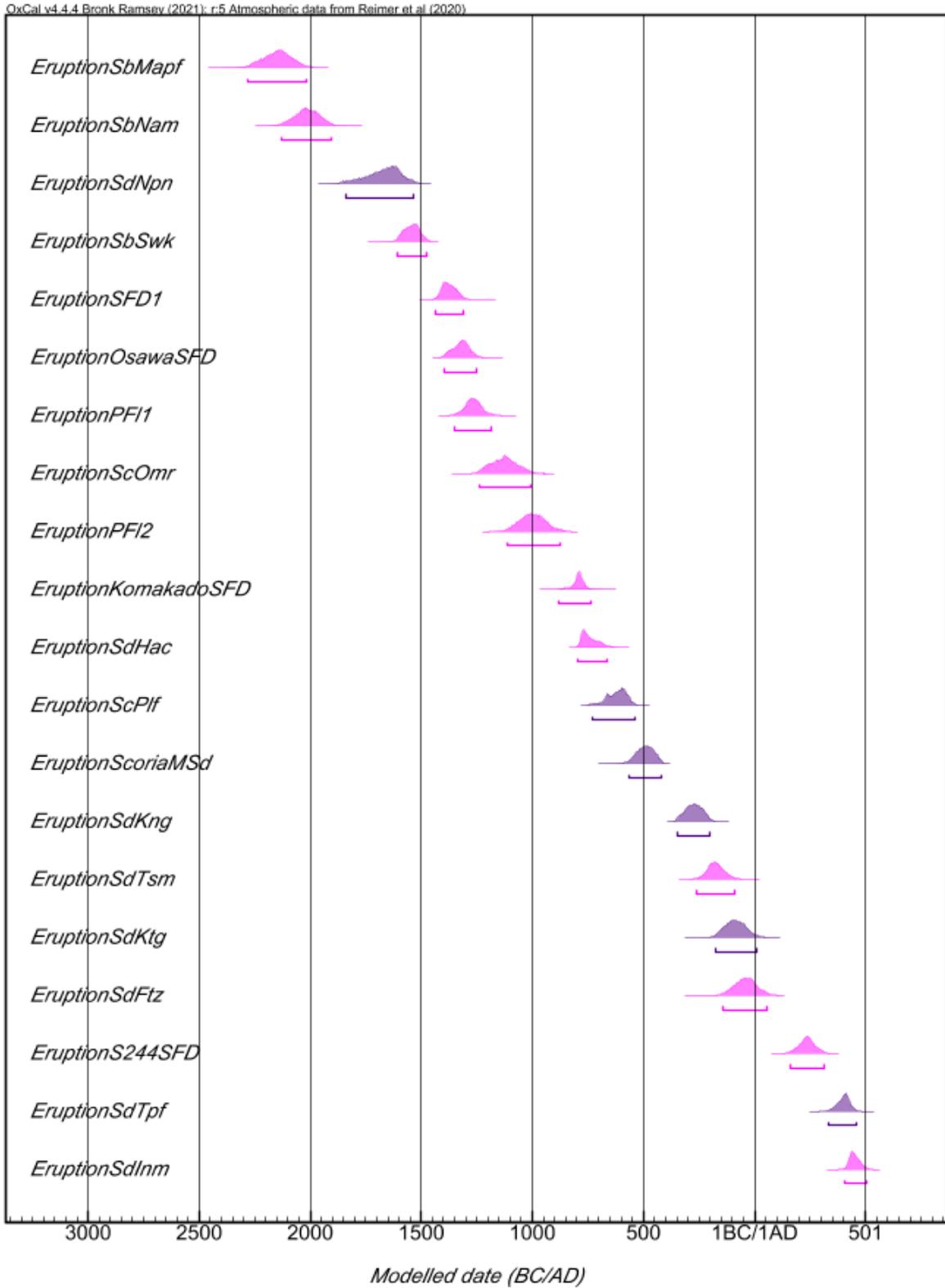


Figure 23 : Multiple plot sorti d'OxCal pour le modèle complet reprenant seulement les éruptions calculées par le modèle. Chacune d'entre elles est associée à un intervalle d'âge (partie 1).

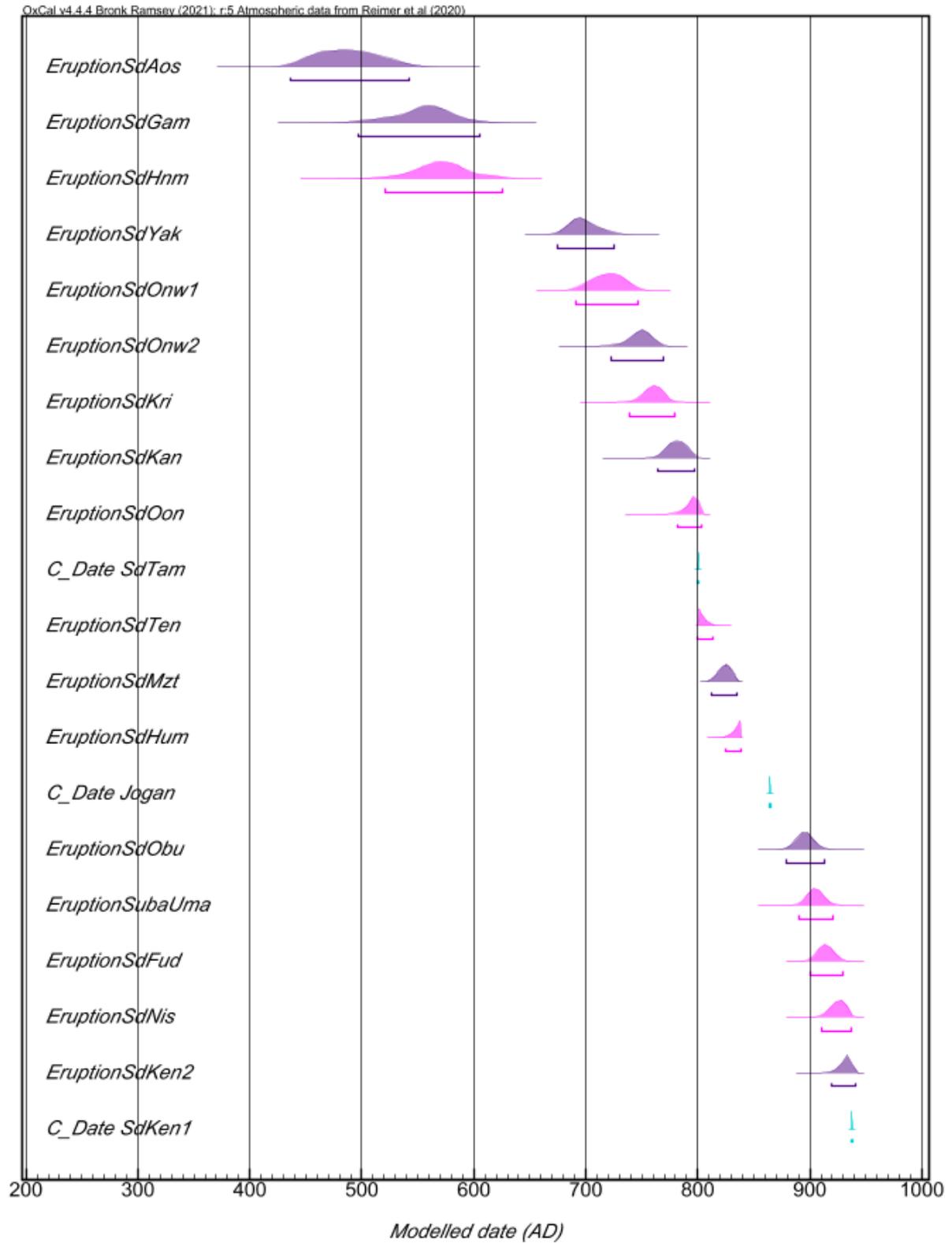


Figure 24 : Multiple plot sorti d'OxCal pour le modèle complet reprenant seulement les éruptions calculées par le modèle. Chacune d'entre elles est associée à un intervalle d'âge (partie 2).

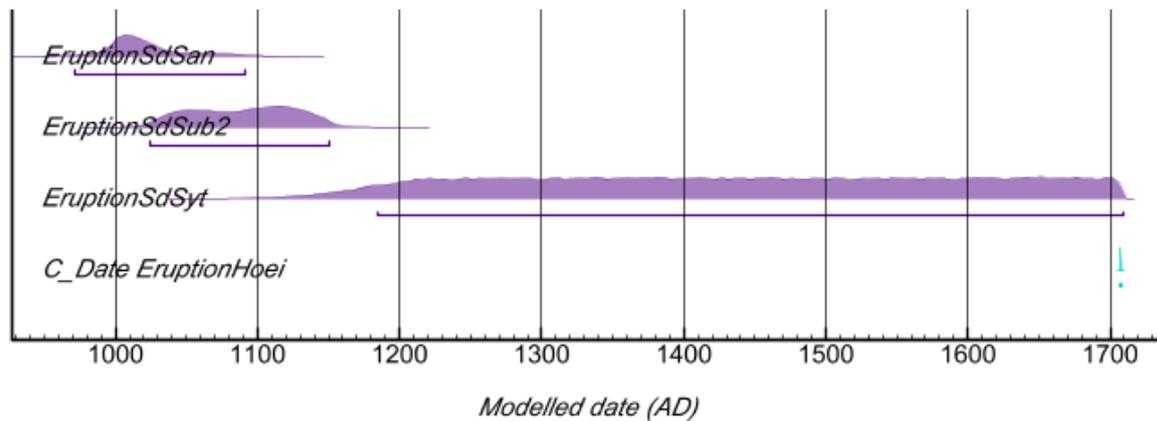


Figure 25 : Multiple plot sorti d'OxCal pour le modèle complet reprenant seulement les éruptions calculées par le modèle. Chacune d'entre elles est associée à un intervalle d'âge (partie 3).

### 10.3 PERSPECTIVES FUTURES

Ce travail représente une première tentative de modélisation de la chronostratigraphie du Mont Fuji sur une période de temps bien précise et avec des données limitées pour mieux connaître le fonctionnement du volcan. Il serait forcément intéressant de compléter le modèle en prenant en compte l'ensemble des périodes volcaniques, c'est-à-dire Hoshiyama, Fujinomiya et Subashiri-a-b-c-d. Cela permettrait d'avoir une meilleure compréhension du fonctionnement du volcan depuis sa création. Inclure toutes les périodes avec les types d'éruption variés et différents rythmes d'éruption donnerait peut-être des résultats statistiques différents et pourrait affiner lesdits résultats.

Au fil des études et autres découvertes scientifiques futures, il est probable que plus de datations au carbone 14 soient disponibles et que d'autres analyses stratigraphiques soient réalisées. Il sera évidemment important d'utiliser ces nouvelles données pour les introduire dans le code du modèle afin de le compléter et, à nouveau, affiner les résultats obtenus. Comme dit précédemment et lorsque de nouvelles données seront disponibles, les résultats de la présente étude pourront servir de base stratégique pour la réévaluation des datations. Plus l'intervalle d'une phase est grand, plus il est urgent de réévaluer cette phase et les échantillons associés.

Lors de l'écriture du code à rentrer dans OxCal, plusieurs dates aberrantes ont été exclues. Parfois, tous les éléments liés à une éruption ont dû être retirés du code, ce qui était le cas pour la coulée Sd-Nak, par exemple. Cela souligne une éventuelle incohérence dans l'ordre stratigraphique proposé dans la publication de *Takada et al. (2016)* et pose la question d'une éventuelle réévaluation de cet ordre stratigraphique. La chronostratigraphie présentée dans ce travail repose en partie sur l'exactitude de l'ordre des couches stratigraphiques. Il est donc important de déterminer correctement l'agencement des couches et de revoir le modèle



chronostratigraphique s'il y a des changements dans la disposition stratigraphique. L'amélioration de la stratigraphie pourrait éventuellement avoir un effet positif sur les datations qui posent un problème de vraisemblance aux lignes 85, 118, 125 et 127 du tableau de sortie d'OxCal.

Une meilleure chronologie est également utile dans d'autres domaines tels que l'archéologie, la paléoclimatologie ou la paléosismologie (Lamair, et al., 2018). Des produits éruptifs du Mont Fuji ont été éjectés à différents emplacements sur le sol, dans les lacs, les forêts... aux alentours du volcan et peuvent être utilisés pour dater les couches stratigraphiques qui leur sont liées (Lamair, et al., 2018). Par exemple, du tephra éjecté lors de l'éruption Hoei de 1707 AD a été retrouvé à environ 100 kilomètres du Mont Fuji (Miyaji, Kan'no, Kanamaru, & Mannen, 2011) (Miyaji, 2002). Ce tephra pourrait servir de tephra marqueur à différents endroits pour définir la chronologie d'autres événements. De la même manière, les produits éruptifs mieux datés pourraient servir lors d'études sismologiques des failles proches du Mont Fuji (voir figure 1). Tout comme dans l'étude de DuRoss *et al.* (2011), il serait possible d'utiliser OxCal pour améliorer la chronologie des dépôts autour du Mont Fuji et de la zone où se trouvent les failles. Il serait aussi envisageable d'utiliser les produits éruptifs datés du Mont Fuji en tant que tephra marqueur ou éruption historique dans les endroits où ces produits sont retombés.

Le travail d'amélioration de la chronologie des éruptions réalisé ici peut permettre l'identification d'événements volcaniques historiques. Avoir un âge précis pour une éruption facilite l'association de cette dernière aux données historiques. S'il est possible faire correspondre les écrits historiques avec des produits éruptifs du Mont Fuji, les datations seront encore plus précises qu'avec les modèles : les fenêtres d'âge seront réduites au minimum lorsqu'elles seront associées à des preuves historiques. Il existe un catalogue des preuves historiques à disposition réalisé par Kobayashi *et al.* (2007) qui pourrait permettre d'améliorer la chronologie absolue.

Pour permettre une meilleure gestion du risque, il serait opportun de calculer la récurrence des événements volcaniques du Mont Fuji. Cela est réalisable avec OxCal, mais dans le cas du code utilisé dans cette étude, les commandes employées pour ce faire n'ont pas permis d'aboutir à un calcul de récurrence. Cependant, la récurrence permet de mieux appréhender un futur événement volcanique et de prendre les mesures nécessaires pour protéger les divers intérêts (Yamanashi Prefecture Office, 2017) (Tychon, 2021-2022). Très peu d'informations



concernant la récurrence des éruptions du Mont Fuji sont disponibles : elle est estimée à  $10^2$ - $10^3$  ans, dépendant de la phase dans laquelle le volcan se trouve (Notsu, Mori, Do Vale, Kagi, & Ito, 2006). L'amélioration de la chronostratigraphie va permettre, in fine, d'affiner cet intervalle de récurrence de l'aléa volcanique.

De plus, la base de données utilisée pourrait également être complétée en prenant en compte d'autres types d'informations à inclure au modèle pour discuter les calculs de récurrence, comme les volumes éruptifs. Ceux-ci ne sont disponibles que de manière indirecte pour l'instant, notamment via la superficie des laves (Yamamoto, Takada, Ishizuka, & Nakano, 2005) et des SIG. Il n'y a pas de moyens d'évaluation faciles qui permettraient de calculer directement une éventuelle loi de récurrence en fonction de la taille des événements.

Plusieurs plans et même des lois, ont été créés au Japon pour protéger divers intérêts en cas d'éruption du mont Fuji. Parmi ceux-ci, le « Basic Framework of Volcano Wide Area Disaster Countermeasures for Mt. Fuji » fut créé en 2006 par le Conseil de la Gestion des Catastrophes. En 2013, la « Proposal for Large-scale Volcano Disaster Countermeasures » fut créée par le gouvernement japonais (Yamamoto & Nakada, 2015). La gestion de crise d'activité volcanique est principalement étudiée dans le « Regional Disaster Prevention Plan ». Ce plan très complet inclut pour la région entière les phases de prévention, de réponse, de récupération et de reconstruction en cas de désastres, incluant ceux dus à l'activité volcanique (Yamanashi Prefecture Office, 2017). À l'avenir, ces plans et lois pourraient tenir compte des nouvelles chronostratigraphies et des calculs de récurrence pour être plus au point pour la préparation des populations, la mise en place des infrastructures, la formation des personnes...

Dans la méthodologie utilisée, des hypothèses ont été émises et des choix ont été posés, notamment concernant des commandes à utiliser. D'autres alternatives peuvent également être testées pour varier les modèles et comparer les différents résultats obtenus.

Le logiciel OxCal est souvent mis à jour. D'ici quelques années, il est possible que de nouvelles commandes et/ou fonctions apparaissent. Selon ce qui sera créé, le code présenté dans ce travail pourra être modifié pour inclure d'éventuels nouveaux éléments.



## 11 CONCLUSION

Le Mont Fuji est un volcan actif qui menace les villes à l'est du Japon et plus particulièrement la mégalopole de Tokyo et ses 37 millions d'habitants ainsi que le bon fonctionnement des vies économique, sociale et touristique de la région (Chakraborty & Jones, 2018) (Yamamoto & Nakada, 2015) (World Population Review, 2022). Malgré les nombreuses plans et lois mis en place par les autorités (Yamanashi Prefecture Office, 2017) (Yamamoto & Nakada, 2015), il est nécessaire d'approfondir les connaissances scientifiques sur le Mont Fuji et de les intégrer au programme japonais de gestion des risques volcaniques.

L'objectif principal de ce travail est d'améliorer la chronostratigraphie du Mont Fuji à l'aide de la base de données élaborée par Takada *et al.* (2016). Le logiciel OxCal rend cette amélioration possible en utilisant les datations au carbone 14 pour créer un modèle statistique des dépôts en exploitant la méthode MCMC. La méthodologie utilisée pour construire le code à entrer dans le logiciel s'est basée sur d'autres études ayant des objectifs similaires (DuRoss, Personius, Crone, Olig, & Lund, 2011) (Reuther, Potter, Coffman, Smith, & Bigelow, 2020) (Tani, et al., 2013) ainsi que sur les informations à disposition dans la base de données qui permettent ou pas d'utiliser certaines commandes du logiciel (Takada, Yamamoto, Ishizuka, & Nakano, 2016).

En fusionnant les informations données par l'ordre stratigraphique et les datations au carbone 14, OxCal a permis d'obtenir en sortie un tableau complet avec des datations modélisées et un degré de confiance associés à chaque échantillon présent dans le code. Les graphiques obtenus avec le logiciel permettent de visualiser les densités de probabilités associées à un échantillon avant et après calibration. Ce sont finalement 45 éruptions qui ont été modélisées pendant les périodes Subashiri-b et Subashiri-c entre -2284 BC et 1708 AD. Seulement 4 d'entre elles sont historiques. Le tableau de résultats renseigne également la durée de chaque phase, ce qui donne un indice sur la priorisation des datations à réévaluer : plus une phase dure longtemps, plus il y a d'incertitudes quant à sa datation.

Finalement, ce travail laisse la porte ouverte à de nombreuses perspectives futures dont le calcul de la récurrence des événements volcaniques du Mont Fuji ainsi que son intégration dans les plans de gestion des risques. L'amélioration de la chronostratigraphie du volcan permettra éventuellement l'identification d'événements volcaniques historiques, ce qui datera encore plus précisément les couches stratigraphiques. De plus, d'autres domaines, tels que l'archéologie ou la paléosismologie, pourront bénéficier de cette amélioration pour dater d'autres phénomènes à des endroits impactés par les produits éruptifs du Mont Fuji. Enfin, au



fil du temps, des améliorations du code seront à apporter en fonction des découvertes scientifiques et des mises à jour d'OxCal.



## 12 BIBLIOGRAPHIE

- Aiming, L., Kenta, I., & Hideto, T. (2013). On-land active thrust faults of the Nankai–Suruga subduction zone: The Fujikawa-kako Fault Zone, central Japan. *Tectonophysics*(601), pp. 1-19.
- Aoki, Y., Tsunematsu, K., & Yoshimoto, M. (2019). Recent progress of geophysical and geological studies of Mt. Fuji Volcano, Japan. *Earth-Science Reviews*(194), pp. 264-282.
- Arai, K.-I., Suzuki, Y., Matsuda, M., Chiba, T., Futatsugi, S., Koyama, M., & Nakashima, K. (2003). Reevaluation of magma discharge volume of the 864-866 Jogan eruption of Fuji volcano based on results of lake Senoumi drilling. *Japan Geoscience Union Meeting abstract V055-P012*.
- Augendre, M. (2006). La cartographie et le zonage du risque volcanique au Japon : impasse ou modèle à suivre ? Dans F. Leone, & F. Vinet, *La vulnérabilité des sociétés et des territoires face aux menaces naturelles - Analyses géographiques* (pp. 54-61). Montpellier: Publications de l'Université Paul-Valéry Montpellier 3.
- Blaauw, M., van Geel, B., Mauquoy, D., & van der Plicht, J. (2004, février). Carbon-14 wiggle-match dating of peat deposits : advantages and limitations. *Journal of Quaternary Science*, 19(2), pp. 177-181.
- Bronck, C. (s.d.). *Chronological Query Language (CQL2) Command Reference*. Consulté le Mai 22, 2022, sur OxCal: [https://intchron.org/tools/oxcalhelp/hlp\\_commands.html](https://intchron.org/tools/oxcalhelp/hlp_commands.html)
- Cabinet Office - Government of Japan. (2004). *Report of the Review Committee of Volcanic Hazard Mitigation of Mt. Fuji*. Récupéré sur Bousai: <http://www.bousai.go.jp/kazan/fujisan-kyougikai/>
- Chakraborty, A., & Jones, T. (2018). Mount Fuji: The Volcano, the Heritage and the Mountain. *Natural Heritage of Japan*, pp. 167-175.
- CIRAM - Science for Art and Cultural Heritage. (2010). *La datation des objets en bois, ivoire, os, tissu, ... Le carbone 14 par AMS*. Récupéré sur chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/[https://www.ciram-art.com/uploads/docs/fr/patrimoine/CIRAM\\_Datation\\_C14.pdf](https://www.ciram-art.com/uploads/docs/fr/patrimoine/CIRAM_Datation_C14.pdf)
- Davies, L., Jensen, B., Froese, D., & Wallace, K. (2016). Late Pleistocene and Holocene tephrostratigraphy of interior Alaska and Yukon: key beds and chronologies over the past 30.000 years. *Quaternary Science Reviews*, pp. 28-53.
- Demoulin, A. (2021). *Cours de Géomorphologie et Géologie du Quaternaire*. Liège: Université de Liège (ULiège).
- DuRoss, C., Personius, S., Crone, A., Olig, S., & Lund, W. (2011). Integration of Paleoseismic Data from Multiple Sites to Develop an Objective Earthquake Chronology: Application to the Weber Segment of the Wasatch Fault Zone, Utah. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 6(101), pp. 27-65-2781.
- Encyclo.co.uk - English Encyclopedia. (s.d.). *Dense Rock Equivalent Definition*. Récupéré sur Encyclo.co.uk: volcanologic calculation



- Encyclopaedia Universalis. (s.d.). *Contexte géodynamique du Japon*. Récupéré sur Encyclopaedia Universalis: <https://www.universalis.fr/media/V120900A/>
- Geological Survey of Japan, AIST. (s.d.). *Fuji Volcano- Petrological characteristics of the eruptions products*. Récupéré sur Active Volcanoes of Japan: [https://gbank.gsj.jp/volcano/Act\\_Vol/fujisan/text/eng/exp-3e.html](https://gbank.gsj.jp/volcano/Act_Vol/fujisan/text/eng/exp-3e.html)
- Heimbürger, J.-F. (2015). Japon : sous les volcans, le nucléaire. *Politique Étrangère, I*(Printemps), pp. 143-156.
- Hosono, M., Mitsui, Y., Ishibashi, H., & Jun, K. (2016). Elastostatic effects around a magma reservoir and pathway due to historic earthquakes: a case study of Mt. Fuji, Japan. *Progress in Earth and Planetary Science*, pp. 3-33.
- Igarashi, Y., Sawa, Y., Yoshioka, K., Matsueda, H., Fujii, K., & Dokiya, Y. (2004, septembre 3). Monitoring the SO<sub>2</sub> concentration at the summit of Mt. Fuji and a comparison with other trace gases during winter. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 109(D17).
- Inoue, K. (2007). Distribution of sediment-related disasters after Hoei Eruption of Fuji Volcano, based on historical documents. (Y. I. Sciences, Éd.) *Fuji Volcano*, pp. 427-439.
- Knight, S. (2012, septembre 16). *Japan finds another gap in its disaster readiness : Mount Fuji*. Consulté le juin 20, 2022, sur NBC News: <https://www.nbcnews.com/id/wbna49048442>
- Kobayashi, M., Takada, A., & Nakano, S. (2007). Eruptive history of Fuji volcano from AD 700 to AD 1000 using stratigraphic correlation of the Kozushima-Tenjosan Tephra. *Bulletin of Geological Survey of Japan*, 57, pp. 409-430.
- Kobayashi, M., Takada, A., & Shun, N. (2007). Eruptive history of Fuji Volcano from AD 700 to AD 1,000 using stratigraphic correlation of the Kozushima-Tenjosan Tephra. *Bulletin of the Geological Survey of Japan*, 11/12, pp. 409-430.
- Lamair, L., Hubert-Ferrari, A., Yamamoto, S., El Ouahabi, M., Vander Auwera, J., Obrochta, S., . . . QuakeRecNankai Team. (2018). Volcanic influence of Mt. Fuji on the watershed of Lake Motosu and its impact on the lacustrine sedimentary record. *Sedimentary Geology*, 363, pp. 200-220.
- Miyaji, N. (2002). *The 1707 Eruption of Fuji Volcano and Its Tephra*.
- Miyaji, N., & Koyama, M. (2007). Recent studies on the 1707 (Hoei) eruption of Fuji volcano. (Y. I. Sciences, Éd.) *Fuji Volcano*, pp. 339-348.
- Miyaji, N., Kan'no, A., Kanamaru, T., & Mannen, K. (2011, octobre 15). High-resolution reconstruction of the Hoei eruption (AD 1707) of Fuji Volcano, Japan. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 207(3-4), pp. 113-129.
- Nakajima, J., & Hasegawa, A. (2007, août 11). Subduction of the Philippine Sea plate beneath southwestern Japan: Slab geometry and its relationship to arc magmatism. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 112(B8).



- Notsu, K., Mori, T., Do Vale, S., Kagi, H., & Ito, T. (2006). Monitoring Quiescent Volcanoes by Diffuse CO<sub>2</sub> Degassing: Case Study of Mt. Fuji, Japan. *Pure and applied Geophysics*, pp. 825-835.
- OxCal. (s.d.). *Chronological Query Language (CQL2) Command Reference*. Récupéré sur OxCal: [https://c14.arch.ox.ac.uk/oxcalhelp/hlp\\_commands.html](https://c14.arch.ox.ac.uk/oxcalhelp/hlp_commands.html)
- Ramsey, C. B. (2000). Comment on 'the use of bayesian statistics for 14C dates of chronologically ordered samples: a critical analysis'. *Radiocarbon*, 42(2), pp. 199-202.
- Ramsey, C. B. (2009). Bayesian analysis of radiocarbon dates. *Radiocarbon*, 51(1), pp. 337-360.
- Ramsey, C. B. (2021, novembre 24). *OxCal 4.4 Manual*. Consulté le avril 25, 2022, sur OxCal 4.4 Manual: [https://c14.arch.ox.ac.uk/oxcalhelp/hlp\\_contents.html#:~:text=OxCal%20is%20a%20program%20designed,calibration%2C%20sapwood%20estimates%20etc.](https://c14.arch.ox.ac.uk/oxcalhelp/hlp_contents.html#:~:text=OxCal%20is%20a%20program%20designed,calibration%2C%20sapwood%20estimates%20etc.))
- Reuther, J., Potter, B., Coffman, S., Smith, H., & Bigelow, N. (2020). Revisiting the timing of the northern lobe of the white river ash volcanic event in eastern Alaska and western Yukon. *Radiocarbon*, 62(1), pp. 169-188.
- Reuther, J., Potter, B., Coffman, S., Smith, H., & Bigelow, N. (2020). Revisiting the timing of the northern lobe of the White River Ash volcanic event Eastern Alaska and Western Yukon. *Radiocarbon*, pp. 169-188.
- Robert, C., & Marin, J.-M. (2009). *Les bases de la statistique bayésienne*. Paris: CEREMADE.
- Romain, A.-C. (2020). *Cours de Méthodologie et Échantillonnage*. Arlon: Université de Liège (ULiège).
- Sabo Office. (s.d.). *Observation System*. Consulté le juillet 04, 2022, sur Mt Fuji Sabo Office: <https://www.cbr.mlit.go.jp/fujisabo/en/bosai/bosaikatudo/katudo-kansokusys.html>
- Sraka, M. (2013). 14C dates and stratigraphy: reconsidering the sequences at Moverna vas (Bela Krajina, southeastern Slovenia). *Documenta Praeistorica*(40), pp. 313-322.
- Suzuki, Y., Chiba, T., Arai, K.-I., Fujii, N., Kiyomiya, D., Koyama, M., . . . Nakashima, K. (2003, mai 27). Detailed effusive process of the 864-866 Jogan lava flows (Aokigahara Lavas) of Fuji Volcano, based on LIDAR altimetry data. *Joint Meeting of Society of Earth and Planetary Science*, pp. 1910-1911.
- Suzuki, Y., Takada, A., Ishizuka, Y., & Kobayashi, M. (2007). Reexamination of the eruptive history of scoria cones on the northwest foot of Fuji Volcano, Japan. *Bulletin of Geological Survey Japan*, 57(11/12), pp. 377-385.
- Tajima, Y., Miyaji, N., Yoshimoto, M., Abe, N., & Chiba, T. (2007). Pyroclastic flows originated from the collapse of scoria cones for the last 2000 years on the north eastern slope of Fuji volcano. *Bulletin of Geological Survey Japan*, pp. 255-267.
- Takada, A., Yamamoto, T., Ishizuka, Y., & Nakano, S. (2016). *Explanatory text of geological map of Fuji volcano*. Tokyo: Institute of Earthquake and Volcano Geology.



- Tani, S., Kitagawa, H., Hong, W., Park, J., Sung, K., & Park, G. (2013). Age determination of the Kawagodaira volcanic eruption in Japan by  $^{14}\text{C}$  wiggle-matching. *Radiocarbon*, 55(2), pp. 748-752.
- Tychon, B. (2021-2022). *Cours de Systèmes d'Alerte Précoce*. Arlon: Université de Liège (ULiège).
- Vandergoes, M., Hogg, A., Lowe, D., Newnham, R., Denton, G., Southon, J., . . . Blaauw, M. (2013). *A revised age for the Kawaka/Oruani tephra, a key marker for the Last Glacial Maximum in New Zealand*. Elsevier Ltd.
- Watkins, N., Sparks, R., Sigurdsson, H., Huang, T., Federman, A., Carey, S., & Ninkovich, D. (1978). Volume and extent of the Minoan tephra from Santorini Volcano: new evidence from deep-sea sediment cores. *Nature*(271), pp. 122-126.
- Williams, M. (2016, septembre 19). *What is the difference between active and dormant volcanoes?* Récupéré sur phys.org: <https://phys.org/news/2016-09-difference-dormant-volcanoes.html>
- World Population Review. (2022). *Tokyo Population 2022*. Consulté le juin 07, 2022, sur World Population Review: <https://worldpopulationreview.com/world-cities/tokyo-population>
- Xu, J., Pan, B., Liu, T., Hajdas, I., Zhao, B., Yu, H., . . . Zhao, P. (2012, décembre 02). Impact of the Millenium eruption of Changbaishan volcano in China: New insights from high-precision radiocarbon wiggle-match dating. *Geophysical research letters*, 40, pp. 1-6.
- Yamamoto, T., & Nakada, S. (2015). Chapter 14 - Extreme Volcanic Risks 2 : Mount Fuji. Dans P. P. John F. Shroder (Éd.), *Volcanic Hazards, Risks and Disasters* (pp. 355-376).
- Yamamoto, T., Ishizuka, Y., & Takada, A. (2007). Surface and Subsurface Geology at the Southwestern Foot of Fuji volcano, Japan: New Stratigraphy and Chemical Variations of the Products. *Bulletin of Geological Survey of Japan* , pp. 97-118.
- Yamamoto, T., Nakano, S., & Ishizuka, Y. (2021, août 27). Temporal variations of magma composition, eruption style and rate at Fuji Volcano, Japan. *Earth, Planet and Space*(73:169).
- Yamamoto, T., Nakano, S., Takada, A., & Kobayashi, M. (2011). New stratigraphy of the recent ejecta on the eastern flank of Fuji volcano. *Bulletin of Geological Survey Japan*, 62(11/12), pp. 405-424.
- Yamamoto, T., Takada, A., Ishizuka, Y., & Nakano, S. (2005). Chronology of the Products of Fuji Volcano Based on New Radiometric Carbon Ages. *Volcanological Society of Japan*(50), pp. 53-70.
- Yamanashi Prefecture Office. (2017, novembre 16). *Risk Management*. Récupéré sur Fujisan World Cultural Heritage Council: <https://www.fujisan-3776.jp/en/preservation/crisis-management/index.html>



## 13 ANNEXES

### 13.1 ANNEXE I : BASE DE DONNÉES

Pour l'allègement des annexes et la facilitation de la lecture, des colonnes n'ayant pas servi à ce travail ont été supprimées de cette annexe.

Tableau 16 : Base de données reprenant les datations carbone 14 brutes des couches stratigraphiques du Mont Fuji. Ce tableau combine les datations de plusieurs études (Takada, Yamamoto, Ishizuka, & Nakano, 2016). Les outliers n'ayant pas servi à la rédaction du code sont surlignés en rouge.

試料番号	試料名	岩相層序ユニット名	ユニット番号 []	対象物 <sup>3)</sup>	<sup>14</sup> C年代	確率	中央値の
Sample No.	Bata Lab No. Sample Name	Rock-stratigraphic unit	Unit No.	Material <sup>3)</sup>	Conventional <sup>14</sup> C age (yBP)	Probability	Median Probability
1	Beta-175083 13-1C	須山胎内溶岩流(Sd-Syt) Suyamatainai Lava Flow	6	a	900±40	1.000 0.460 0.187 0.353	AD1120
2	Beta-173984 SKYC-1			a	1000±40	0.628 0.372 0.763 0.206 0.031	
3	Beta-211840 051128c-1	須走口 2溶岩流(Sd-Sub2) Subashiriguchi 2 Lava Flow	7	a	1000 ±40	0.628 0.372 0.763 0.206 0.031	AD1030
4	Beta-185893 03110202c			a	1030±40	0.076 0.846 0.063 0.015 1.000	
5	Beta-199182 FJ-59-1	三角山神社溶岩流(Sd-San) SankakuyamaTjinja Lava Flow	8	a	990±40	1.000 0.608 0.319 0.073	AD1050



6	Beta-199183 FJ-59-2			a	1060±50	0.005 0.965 0.025 0.006	AD980	
						0.189 0.811		
7	Beta-197426 040603C-1	剣丸尾第二溶岩流(Sd-Ken2) Kenmarubi 2 Lava Flow	9	a	950±40	0.994 0.006	AD1100	
							0.263 0.737	
8	Beta-253391 08080303C			c	1060±40	1.000 0.145 0.855	AD980	
9	Beta-224228 06111401 C-2			a	930±60	0.011 0.989	AD1110	
						1.000		
10	Beta-173986 021126C-2	日沢溶岩流(Sd-Nis) Nissawa Lava Flow	10	a	1050±40	1.000 0.055 0.945	AD990	
11	Beta-167661 FJM403	不動沢火砕丘(Sd-Fud) Fudosawa Pyroclastic Cone	12	a	960±40	0.008 0.992	AD1090	
							0.315 0.505 0.180	
12	Beta-173165 06-2C	不動沢溶岩流(Sd-Fud) Fudosawa Lava Flow		a	950±40	0.994 0.006	AD1100	
							0.263 0.737	
13	Beta-163325 1201C-1			a	1020±40	0.041 0.801 0.121 0.037	AD1010	
						1.000		



14	Beta-169925 FJM416	須走口馬返5降下スコリア堆積物 Subashiriguchi-Umagaeshi 5 Scoria Fall Deposit	n.s.	b	1130±40	0.052 0.948	AD920
						1.000	
15	Beta-173172 021108-04-6C	大淵丸尾火砕丘(Sd-Obu) Obuchimarubi Pyroclastic Cone	13	d	1050±40	1.000	AD990
						0.055 0.945	
16	Beta-173171 021108-04-5C			c	970±40	1.000	AD1090
						0.371 0.475 0.153	
17	Beta-163322 1129C-1	大淵丸尾溶岩流(Sd-Obu) Obuchimarubi Lava Flow		a	1170±40	0.012 0.988	AD850
						0.165 0.805 0.030	
18	Beta-197427 040604C-1			a	1130±40	0.052 0.948	AD920
						1.000	
19	Beta-187068 031202C-4	東臼塚南溶岩流(CSd-Hum) Higashiusuzuka-minami Lava Flow	16	a	1190±40	0.070 0.833 0.096	AD830
						1.000	
20	Beta-199185 FJ-60-2	水ヶ塚檜丸尾溶岩流(Sd-Mzt) Mizugatsuka-Hinokimarubi Lava Flow	18	a	1230±40	1.000	AD790
						0.274 0.124 0.602	
21	Beta-199184 FJ-60-1			a	1240±40	1.000	AD770
						0.556 0.162 0.096 0.055 0.131	
22			19	c	1290±90	0.956 0.044	AD750



	Beta-187549 031219C-1	天神山伊賀殿山溶岩流(Sd-Ten) Tenjin-yama-Igatonoyama Lava Flow				0.788 0.071 0.052 0.090	
23	Beta-188854 FJ-55-2	鷹丸尾溶岩流(Sd-Tam) Takamarubi Lava Flow	20	c	1260±40	0.780 0.220 1.000	AD740
24	Beta-169921 FJM412	大流溶岩流(Sd-Oon) Onaga re Lava Flow	21	a	1220±40	1.000 0.136 0.115 0.749	AD800
25	Beta-173162 011202C-1	鍵子山溶岩流(Sd-Kan) Kansuyama Lava Flow	22	a	1220±60	0.938 0.062 0.203 0.797	AD800
26	Beta-163322 1112C-1			a	1320±60	0.910 0.090 0.732 0.268	AD710
27	Beta-187071 031203-2	白大竜王氷池溶岩流(Sd-Kri) Hakudairyuo-Koriike Lava Flow	23	a	1340±40	0.817 0.183 0.856 0.144	AD680
28	Beta-187070 031203-1			a	1560±40	1.000 0.686 0.147 0.167	AD490
29	Beta-163318 011019C-2	御庭奥庭第二溶岩流(Sd-Onw2) Oniwa-Okuniwa 2 Lava Flow	24	a	1250±40	0.690 0.310 0.904 0.052 0.044	AD750
30				a	1300±40	0.993 0.005 0.002	AD710



	Beta-185890 FJ-39-2					0.685 0.315	
31	Beta-187067 031130C-3			a	1330±60	0.939 0.036 0.026 0.759 0.241	AD700
32	Beta-222263 060528-3	御庭奥庭第一溶岩流(Sd-Onw1) Oniwa-Okuniwa 1 Lava Flow	25	a	1180±40	0.034 0.966 1.000	AD840
33	Beta-163315 011015-6			a	1280±40	0.920 0.046 0.034 0.614 0.386	AD720
34	Beta-163314 011014-5	烧野火碎丘(Sd-Yak) Yakeno Pyroclastic Cone	26	a	1340±40	0.817 0.183 0.856 0.144	AD680
35	Beta-169924 FJM415			c	1300±40	0.993 0.005 0.002 0.685 0.315	AD710
36	Beta-159725 FJM316	烧野西丸尾溶岩流(Sd-Yak) Yakeno-Nishimarubi Lava Flow		a	1250±40	0.690 0.310 0.904 0.052 0.044	AD750
37	Beta-159726 FJM317			a	1240±40	1.000 0.556 0.162 0.096 0.055 0.131	AD770
38				a	1320±40	1.000	AD690



	Beta-161264 FJM320					0.646 0.103 0.250	
39	Beta-1 59724 FJM315			a	1540±40	1.000 0.593 0.030 0.377	AD510
40	Beta-191025 25-02-01C	中ノ茶屋溶岩流(Sd-Nak) Nakanochaya Lava Flow	30	a	1430±40	1.000 1.000	AD620
41	Beta-309862 11100307			e	1580±30	1.000 0.116 0.295 0.590	AD480
42	Beta-184537 031014-3	檜丸尾1溶岩流(Sd-Hnm) Hinokimarubi 1 Lava Flow	31	c	1510±40	0.266 0.037 0.697 0.070 0.102 0.828	AD550
43	Beta-188844 FJ-51-1	雁ノ穴丸尾溶岩流(Sd-Gam) Gannoanamarubi Lava Flow	32	a	1520±40	1.000 0.164 0.144 0.692	AD540
44	Beta-188845 FJ-51-2			a	1590±60	1.000 1.000	AD470
45	Beta-147685 FJM301	青沢溶岩流(Sd-Aos) Aosawa Lava Flow	37	a	1570±40	1.000 0.701 0.299	AD480
46	Beta-136403 FJM104			c	1570±70	1.000 1.000	AD480
47				c	1750±80	0.989 0.007 0.003	AD280



	Beta-136404 FJM105					0.052 0.948	
48	Beta-199176 041127C-1	印野丸尾溶岩流(Sd-Inm) Innomarubi Lava Flow	39	a	1600±40	1.000 0.275 0.213 0.512	AD470
49	Beta-169923 FJM414	火山麓扇状地I堆積物(vf1) Volcanic fan I deposits	4	a	1790±40	1.000 0.075 0.181 0.441 0.303	AD240
50	Beta-191027 04032802-1	滝沢火砕流堆積物(Sd-Tpf) Takizawa Pyroclastic Flow Deposits	38	a	1510±40	0.266 0.037 0.697 0.070 0.102 0.828	AD550
51	Beta-191028 04032802-5			a	1540±40	1.000 0.593 0.030 0.377	AD510
52	Beta-169922 FJM413			a	1690±40	1.000 0.123 0.877	AD350
53	Beta-184535 031011-6			a	1810±40	0.019 0.820 0.161 1.000	AD200
54	Beta-270704 05112407C			a	1700±40	1.000 0.190 0.810	AD340
55	Beta-185894 03110304C-2			a	1800 ±80	1.000 0.725 0.275	AD220



56	Beta-212494 05112701C	S-24-2降下スコリア堆積物 S-24-2 Scoria Fall Deposit	n.s.	e	1830±40	0.952	AD180
						0.002 0.045	
57	Beta-167659 FJM401	須走口馬返1降下スコリア堆積物 Subashiriguchi-Umagaeshi 1 Scoria Fall Deposit	n.s.	a	1850±40	1.000	AD170
						0.007 0.993	
58	Beta-155449 FJM402	ニツ塚噴出物(Sd-Ftz) Futatsuzuka Eruption Products	42	c	2050±40	0.986	BC70
						0.014 0.025 0.975	
59	Beta-173158 021114C-2	小天狗溶岩流(Sd-Ktg) Kotengu Lava Flow	43	a	2120±40	0.110	BC150
						0.008 0.883 0.955 0.045	
60	Beta-199178 FJ-56-1	土丸尾溶岩流CSd-Tsm) Tsuchimarubi Lava Flow	45	a	2220±40	1.000	BC280
						0.110 0.890	
61	Beta-185826 FJM426	火山麓扇状地II堆積物(vf2) Volcanic fan II deposits	48	a	2190±40	0.992	BC280
						0.008 0.618 0.076 0.306	
62	Beta-185825 FJM425	剣ヶ峰噴出物(Sc-Kng) (S-22降下スコリア堆積物を含む) Kengamine Eruption Products	49	a	2220±40	1.000	BC280
						0.110 0.890	
63	Beta-15271 5 1129C-2	(including S-22 Scoria Fall Deposit)	49	d	2220±40	1.000	BC280
						0.110 0.890	
64	Beta-177223 FJM420		49	a	2200±40	1.000	BC280
						0.110 0.890	



65	Beta-169920 FJM411			c	1780±40	0.993 0.007 0.081 0.449 0.470	AD250
66	Beta-163326 1204C-5			c	2080±40	1.000 0.304 0.696	BC100
67	Beta-173169 021108-04-3C			c	2370±40	0.063 0.013 0.924 0.044 0.956	BC460
68	Beta-136408 FJM204	火山麓扇状地II堆積物(vf2) Volcanic fan II deposits	48	b	2370±120	1.000 0.186 0.084 0.029 0.701	BC500
69	Beta-163312 FJM330			b	2440±40	0.239 0.147 0.614 0.243 0.075 0.682	BC550
70	Beta-159719 FJM310	三島岳噴出物(Sc-Msd) (S-18降下スコリア堆積物を含む) Mishimadake Eruption Products (including S-18 Scoria Fall Deposit)	53	a	2440±40	0.239 0.147 0.614 0.243 0.075 0.682	BC550
71	Beta-163327 1204C-5			c	2520±40	0.993 0.007 0.284 0.143 0.573	BC650
72	Beta-177221 FJM418	火山麓扇状地II堆積物(vf2) Volcanic fan II deposits	48	b	2470±40	1.000 0.370 0.302 0.294 0.033	BC620



73	Beta-159723 FJM314			a	2490±60	1.000 0.277 0.723	BC620
74	Beta-159720 FJM311	須走-c期火砕流堆積物(Sc-Pfl) Subashiri-c Stage Pyroclastic Flow Deposit	60	a	2510±40	1.000 0.222 0.156 0.621	BC640
75	Beta-159722 FJM313			a	2550±40	0.460 0.005 0.127 0.409 0.562 0.123 0.315	BC680
76	Beta-159721 FJM312			a	2510±40	1.000 0.222 0.156 0.621	BC640
77	Beta-171069 FJM430			a	2550±40	0.460 0.005 0.127 0.409 0.562 0.123 0.315	BC680
78	Beta-159718 FJM309			八軒溶岩流(Sc-Hac) Hachiken Lava Flow	61	a	2540±40
79	Beta-158211 FJM305	駒門降下スコリア堆積物 Komakado Scoria Fall Deposit	n.s.	c	2620±40	0.997 0.003 1.000	BC800
80			48	a	2880±70	0.996 0.004	BC1070



	Beta-136406 FJM202	火山麓扇状地II堆積物(vf2) Volcanic fan II deposits				0.050 0.063 0.820 0.066	
81	Beta-161972 FJM321	須走-c期火砕流堆積物(CSc-Pfl) Subashiri-c Stage Pyroclastic Flow Deposits	60	a	2860±40	0.011 0.013 0.976 0.051 0.905 0.044	BC1030
82	Beta-16991 9 FJM410	御殿場岩屑なだれ堆積物(Sc-God) Gotenba Debris Avalanche Deposit	63	c	3260±40	1.000 0.322 0.678	BC1540
83	Beta-167662 FJM404			c	5240±50	0.111 0.889 0.080 0.156 0.764	BC4060
84	Beta-167663 FJM405	S-13 (砂沢)降下スコリア堆積物 S~13 (Zunasawa) Scoria Fall Deposit	n.s.	a	3070±40	1.000 1.000	BC1330
85	Beta-163317 011018C-1	大室山片蓋山噴出物(CSc-Omr) Omuroyama-Katabutayama Eruption Products	71	a	3010±40	0.164 0.836 0.103 0.860 0.037	BC1250
86	Beta-163304 FJM322	火山麓扇状地II堆積物(vf2) Volcanic fan II deposits	48	b	3030±40	0.959 0.019 0.022 0.268 0.732	BC1280
87	Beta-171070 FJM419	須走-c期火砕流堆積物(Sc-Pfl) Subashiri-c Stage Pyroclastic Flow Deposits	60	a	3040±50	0.942 0.032 0.026 0.342 0.658	BC1290
88			n.s.	a	3110±50	0.040 0.950 0.010	BC1370



	Beta-136402 FJM103	大沢降下スコリア堆積物 Osawa Scoria Fall Deposit				0.521 0.479	
89	Beta-163306 FJM324	s-io降下スコリア堆積物 S~! ○ Scoria Fall Deposit	n.s.	c	3090±40	0.985 0.015 0.399 0.601	BC1350
90	Beta-161263 FJM319	火山麓扇状地II堆積物(vf2) Volcanic fan II deposits	48	a	3230±40	0.142 0.858 0.037 0.963	BC1500
91	Beta-136405 FJM201			a	3230±80	0.952 0.048 0.190 0.810	BC1510
92	Beta-136406 FJM203			a	3270±100	0.010 0.000 0.952 0.037 1.000	BC1560
93	Beta-163307 FJM325	須走-c期火砕流堆積物CSc-Pfl) Subashiri-c Stage Pyroclastic Flow Deposits	60	a	3240±40	1.000 0.140 0.021 0.839	BC1520
94	Beta-216422 060330-8	サワラ山北林道溶岩流(Sb-Swk) Sawarayamakita kita-rindo Lava Flow	77	a	3250±40	1.000 0.227 0.645 0.128	BC1530
95	Beta-173157 021114C-1	日本ランド溶岩流(Sb-Npn) Nippon-land Lava Flow	83	a	3400±70	1.000 0.080 0.920	BC1700
96	Beta-163323 1129C-3			a	3620±40	0.102 0.898 1.000	BC1980



97	Beta-159727 FJM318	滑沢溶岩流CSb-Nam) Namesawa Lava Flow	90	a	3690±40	0.087	BC2080
						0.913	
98	Beta-270706 09112310C-1	間堀川火砕流堆積物(Sb-Mapf) Maborigawa Pyroclastic Flow Deposit	94	a	3750±50	1.000	BC2160
						0.006	
						0.987 0.006	
						0.101	
						0.004 0.621	
						0.273	

Légende (Takada, Yamamoto, Ishizuka, & Nakano, 2016) : a = charred material within the deposit, b = wood within the deposit, c = organic sediments below the deposit, d = organic sediments above the deposit, e = charred material just below the deposit



## 13.2 ANNEXE II : CODE POUR LE MODÈLE ALLANT DE 700 À 1000 AD

```

Plot()
{
  Sequence("FUJI7001000")
  {
    Boundary("base", AD(500));
    Phase("SdYak")
    {
      R_Date("Beta-1 59724 FJM315", 1540, 40);
      R_Date("Beta-1 63314 011014-5", 1340, 40);
      R_Date("Beta-161264 FJM320", 1320, 40);
      R_Date("Beta-159725 FJM316", 1250, 40);
      R_Date("Beta-1 59726 FJM317", 1240, 40);
    };
    Date("EruptionSdYak")
    {
      color="indigo";
    };
    R_Date("Beta-1 69924 FJM415", 1300, 40);
    R_Date("SdOnw1", 1280, 40);
    Date("EruptionSdOnw1")
    {
      color="magenta";
    };
    Phase("SdOnw2")
    {
      R_Date("Beta-187067 031130C-3", 1330, 40);
      R_Date("Beta-185890 FJ-39-2", 1300, 40);
      R_Date("Beta-163318 011019C-2", 1250, 40);
    };
    Date("EruptionSdOnw2")
    {
      color="indigo";
    };
    R_Date("SdKri", 1340, 40);
    Date("EruptionSdKri")
    {
      color="magenta";
    };
    Phase("SdKan")
    {
      R_Date("Beta-163322 1112C-1", 1320, 60);
      R_Date("Beta-173162 011202C-1", 1220, 60);
    };
    Date("EruptionSdKan")
    {
      color="indigo";
    };
    R_Date("SdOon", 1220, 40);
    Date("EruptionSdOon")
  }
}

```



```
{
  color="magenta";
};
C_Date("SdTam", AD(800))
{
  color="darkturquoise";
};
Date("EruptionSdTam")
{
  color="magenta";
};
R_Date("SdTam", 1290, 90);
Phase("SdMzt")
{
  R_Date("Beta-199184 FJ-60-1", 1240, 40);
  R_Date("Beta-199185 FJ-60-2", 1230, 40);
};
Date("EruptionSdMzt")
{
  color="indigo";
};
R_Date("SdHum", 1190, 40);
Date("EruptionSdHum")
{
  color="magenta";
};
C_Date("IzKt", AD(838))
{
  color="darkturquoise";
};
C_Date("EruptionJogan", AD(864))
{
  color="darkturquoise";
};
R_Date("Beta-173172 021108-04-6C obu", 1050, 40);
Phase("SdObu")
{
  R_Date("Beta-163322 1129C-1", 1170, 40);
  R_Date("Beta-197427 040604C-1", 1130, 40);
};
Date("EruptionSdObu")
{
  color="indigo";
};
R_Date("SubashiriguchiUmagaeshiSFD", 1130, 40);
Date("EruptionSubaUma")
{
  color="magenta";
};
R_Date("SdFud", 1020, 40);
```



```
Date("EruptionSdFud")
{
  color="magenta";
};
R_Date("SdNis", 1050, 40);
Date("EruptionSdNis")
{
  color="magenta";
};
Date("EruptionSdKen2")
{
  color="indigo";
};
C_Date("SdKen1", AD(937))
{
  color="darkturquoise";
};

R_Date("Beta-199182 FJ-59-1 Sd San", 990, 40);
Date("EruptionSdSan");
{
  color="indigo";
};
Phase("SdSub2")
{
  R_Date("Beta-185893 03110202c", 1030, 40);
  R_Date("Beta-211840 051128c-1", 1000, 40);
};
Date("EruptionSdSub2")
{
  color="indigo";
};
Phase("SdSyt")
{
  R_Date("Beta-173984 SKYC-1", 1000, 40);
  R_Date("Beta-175083 13-1C", 900, 40);
};
Date("EruptionSdSyt")
{
  color="indigo";
};
};
Boundary("top", AD(1000));
};
};
};
```



### 13.3 ANNEXE III : CODE POUR LE MODÈLE COMPLET ALLANT DE LA PÉRIODE SUBASHIRI-B À AUJOURD'HUI

```

Plot()
{
  Sequence("FUJISubashiriB")
  {
    Boundary("base");
    R_Date("Beta-270706 09112310C-1 SbMapf", 3750, 50);
    Date("EruptionSbMapf")
    {
      color="magenta";
    };
    R_Date("Beta-159727 FJM318 SbNam", 3690, 40);
    Date("EruptionSbNam")
    {
      color="magenta";
    };
    Phase("phaseSdNpn")
    {
      R_Date("Beta-163323 1129C-3 SdNpn", 3620, 40);
      R_Date("Beta-173157 021114C-1 SdNpn", 3400, 70);
      Span("SSdNpn");
      Interval("ISdNpn");
    };
    Date("EruptionSdNpn")
    {
      color="indigo";
    };
    R_Date("Beta-216422 060330-8 SbSwk", 3250, 40);
    Date("EruptionSbSwk")
    {
      color="magenta";
    };
    R_Date("Beta-163307 FJM325 Plf", 3240, 40);
    Phase("VF3")
    {
      R_Date("Beta-136406 FJM203 VF2", 3270, 100);
      R_Date("Beta-136405 FJM201 VF2", 3230, 80);
      R_Date("Beta-161263 FJM319 VF2", 3230, 40);
      Span("VF3");
      Interval("VF3");
    };
    R_Date("Beta-163306 FJM324 SFD", 3090, 40);
    Date("EruptionSFD1")
    {
      color="magenta";
    };
    R_Date("Beta-136402 FJM103OsawaSFD", 3110, 50);
    Date("EruptionOsawaSFD")
    {

```



```

color="magenta";
};
R_Date("Beta-171070 FJM419 PFl", 3040, 50);
Date("EruptionPFl1")
{
color="magenta";
};
R_Date("Beta-163304 FJM322 VF2", 3030, 40);
R_Date("Beta-163317 011018C-1 ScOmr", 3010, 40);
Date("EruptionScOmr")
{
color="magenta";
};
R_Date("Beta-161972 FJM321 ScPfl Flowdeposits", 2860, 40);
Date("EruptionPFl2")
{
color="magenta";
};
R_Date("Beta-136406 FJM202 VF2", 2880, 70);
R_Date("Beta-158211 FJM305 KomakadoScoriaFallDeposit", 2620, 40);
Date("EruptionKomakadoSFD")
{
color="magenta";
};
R_Date("Beta-159718 FJM309 SdHac", 2540, 40);
Date("EruptionSdHac")
{
color="magenta";
};
Phase("ScPfl")
{
R_Date("Beta-171069 FJM430", 2550, 40);
R_Date("Beta-159722 FJM313 SdPlf", 2550, 40);
R_Date("Beta-159721 FJM312 SdPlf", 2510, 40);
R_Date("Beta-159720 FJM311 SdPfl", 2510, 40);
Span("ScPlf");
Interval("ScPlf");
};
Date("EruptionScPlf")
{
color="indigo";
};
Phase("VolcanicDepositVF2")
{
R_Date("Beta-159723 FJM314 VF2", 2490, 60);
R_Date("Beta-177221 FJM418 VF2", 2470, 40);
Span("VDVF2");
Interval("VDVF2");
};
Phase("ScoriaMSd")

```



```

{
  R_Date("Beta-163327 1204C-5 ScoriaMSd", 2520, 40);
  R_Date("Beta-15971 9 FJM310 ScoriaMSd", 2440, 40);
  Span("ScoriaMSd");
  Interval("ScoriaMSd");
};
Date("EruptionScoriaMSd")
{
  color="indigo";
};
Phase("VF1")
{
  R_Date("Beta-163312 FJM330 VF1", 2440, 40);
  R_Date("Beta-136408 FJM204 VF1", 2370, 120);
  Span("VF1");
  Interval("VF1");
};
R_Date("Beta-15271 5 1129C-2 SdKng", 2220, 40);
Phase("SdKng")
{
  R_Date("Beta-185825 FJM425 SdKng", 2220, 40);
  R_Date("Beta-177223 FJM420 SdKng", 2200, 40);
  Span("SdKng");
  Interval("SdKng");
};
Date("EruptionSdKng")
{
  color="indigo";
};
R_Date("Beta-185826 FJM426 VF2", 2190, 40);
R_Date("Beta-199178 FJ-56-1 SdTsm", 2220, 40);
Date("EruptionSdTsm")
{
  color="magenta";
};
R_Date("Beta-173158 021114C-2 SdKtg", 2120, 40);
Date("EruptionSdKtg")
{
  color="magenta";
};
Date("EruptionSdFtz")
{
  color="magenta";
};
R_Date("Beta-155449 FJM402 SdFtz", 2050, 40);
R_Date("Beta-167659 FJM401 Suba-umag Scoria", 1850, 40);
Date("EruptionSubaUmaScorie")
{
  color="magenta";
};

```



```
R_Date("Beta-212494 05112701C S-24-4 SFD", 1830, 40);
Date("EruptionS244SFD")
{
  color="magenta";
};
Phase("SdTpff")
{
  R_Date("Beta-184535 031011-6 SdTpff", 1810, 40);
  R_Date("Beta-185894 03110304C-2 SdTpff", 1800, 80);
  R_Date("Beta-270704 05112407C SdTpff", 1700, 40);
  R_Date("Beta-169922 FJM413SdTpff", 1690, 40);
  Span("SdTpff");
  Interval("SdTpff");
};
Date("EruptionSdTpff")
{
  color="indigo";
};
R_Date("Beta-199176 041127C-1 SdInm", 1600, 40);
Date("EruptionSdInm")
{
  color="magenta";
};
R_Date("Beta-147685 FJM301 SdAos", 1570, 40);
Date("EruptionSdAos")
{
  color="magenta";
};
R_Date("Beta-136403 FJM104 SdAos", 1570, 70);
Phase("SdGam")
{
  R_Date("Beta-188845 FJ-51-2 SdGam", 1590,60);
  R_Date("Beta-188844 FJ-51-1 SdGam", 1520, 40);
};
Date("EruptionSdGam")
{
  color="indigo";
};
Date("EruptionSdHnm")
{
  color="magenta";
};
R_Date("Beta-184537 031014-3 SdHnm", 1510,40);
Phase("SdYak")
{
  R_Date("Beta-1 59724 FJM315", 1540, 40);
  R_Date("Beta-1 63314 011014-5", 1340, 40);
  R_Date("Beta-161264 FJM320", 1320, 40);
  R_Date("Beta-159725 FJM316", 1250, 40);
  R_Date("Beta-1 59726 FJM317", 1240, 40);
```



```
Span("SdYak");
Interval("SdYak");
};
Date("EruptionSdYak")
{
  color="indigo";
};
R_Date("Beta-1 69924 FJM415", 1300, 40);
R_Date("SdOnw1", 1280, 40);
Date("EruptionSdOnw1")
{
  color="magenta";
};
Phase("SdOnw2")
{
  R_Date("Beta-187067 031130C-3", 1330, 40);
  R_Date("Beta-185890 FJ-39-2", 1300, 40);
  R_Date("Beta-163318 011019C-2", 1250, 40);
  Span("SdOnw2");
  Interval("SdOnw2");
};
Date("EruptionSdOnw2")
{
  color="indigo";
};
R_Date("SdKri", 1340, 40);
Date("EruptionSdKri")
{
  color="magenta";
};
Phase("SdKan")
{
  R_Date("Beta-163322 1112C-1", 1320, 60);
  R_Date("Beta-173162 011202C-1", 1220, 60);
  Span("SdKan");
  Interval("SdKan");
};
Date("EruptionSdKan")
{
  color="indigo";
};
R_Date("SdOon", 1220, 40);
Date("EruptionSdOon")
{
  color="magenta";
};
C_Date("SdTam", AD(800))
{
  color="darkturquoise";
};
```



```

Date("EruptionSdTEn")
{
  color="magenta";
};
R_Date("SdTEn", 1290, 90);
Phase("SdMzt")
{
  R_Date("Beta-199184 FJ-60-1", 1240, 40);
  R_Date("Beta-199185 FJ-60-2", 1230, 40);
  Span("SdMzt");
  Interval("SdMzt");
};
Date("EruptionSdMzt")
{
  color="indigo";
};
R_Date("SdHum", 1190, 40);
Date("EruptionSdHum")
{
  color="magenta";
};
C_Date("IzKt", AD(838))
{
  color="darkturquoise";
};
C_Date("EruptionJogan", AD(864))
{
  color="darkturquoise";
};
R_Date("Beta-173172 021108-04-6C obu", 1050, 40);
Phase("SdObu")
{
  R_Date("Beta-163322 1129C-1", 1170, 40);
  R_Date("Beta-197427 040604C-1", 1130, 40);
  Span("SdObu");
  Interval("SdObu");
};
Date("EruptionSdObu")
{
  color="indigo";
};
R_Date("SubashiriguchiUmagaeshiSFD", 1130, 40);
Date("EruptionSubaUma")
{
  color="magenta";
};
R_Date("SdFud", 1020, 40);
Date("EruptionSdFud")
{
  color="magenta";
};

```



```
};
R_Date("SdNis", 1050, 40);
Date("EruptionSdNis")
{
  color="magenta";
};
Date("EruptionSdKen2")
{
  color="magenta";
};
C_Date("SdKen1", AD(937))
{
  color="darkturquoise";
};
R_Date("Beta-199182 FJ-59-1 Sd San", 990, 40);
Date("EruptionSdSan")
{
  color="magenta";
};
Phase("SdSub2")
{
  R_Date("Beta-185893 03110202c", 1030, 40);
  R_Date("Beta-211840 051128c-1", 1000, 40);
  Span("SdSub2");
  Interval("SdSub2");
};
Date("EruptionSdSub2")
{
  color="indigo";
};
Phase("SdSyt")
{
  R_Date("Beta-173984 SKYC-1", 1000, 40);
  R_Date("Beta-175083 13-1C", 900, 40);
  Span("SdSyt");
  Interval("SdSyt");
};
Date("EruptionSdSyt")
{
  color="indigo";
};
C_Date("EruptionHoei", AD(1707))
{
  color="darkturquoise";
};
};
Boundary("top", AD(1800));
};
```



### 13.4 ANNEXE IV : RÉSULTATS OBTENUS AVEC LE CODE DU MODÈLE ALLANT DE 700 À 1000 AD

Tableau 17 : Tableau de sortie d'OxCal pour le modèle 700-1000 AD. Ce tableau comprend les dates modélisées et l'intervalle dans lequel elles sont comprises, un degré de confiance correspondant aux datations modélisées ainsi que l'indice d' « agreement » A et l'indice de convergence C (partie 1).

Name	Unmodelled (BC/AD)			Modelled (BC/AD)			Indices			Select	Page break	
	from	to	%	from	to	%	A <sub>model</sub> <sup>34</sup>	A <sub>overall</sub> <sup>32.8</sup>	A <sub>comb</sub> A L P C			
Show all	Warning! No boundaries used - check manual											
Show structure	Warning! Poor agreement - A= 32.8%(A<= 60.0%)											
	Warning! Poor agreement - A= 34.0%(A<= 60.0%)											
▼ Sequence FUJ7001000										<input checked="" type="checkbox"/>	2	
▼ Boundary base	500	501	95.4	500	501	95.4			100	100	<input checked="" type="checkbox"/>	3
500.5											<input checked="" type="checkbox"/>	4
▼ Phase SdYak											<input checked="" type="checkbox"/>	5
R_Date Beta-1 59724 FJM315	428	601	95.4	497	604	95.4		106.8		97.8	<input checked="" type="checkbox"/>	6
R_Date Beta-1 63314 011014-5	612	775	95.4	610	704	95.4		116.6		98.3	<input checked="" type="checkbox"/>	7
R_Date Beta-161264 FJM320	646	777	95.4	646	707	95.4		109		98.4	<input checked="" type="checkbox"/>	8
R_Date Beta-159725 FJM316	671	880	95.4	660	712	95.4		84.4		96.4	<input checked="" type="checkbox"/>	9
R_Date Beta-1 59726 FJM317	674	884	95.4	660	714	95.4		70.5		97.7	<input checked="" type="checkbox"/>	10
EruptionSdYak				674	725	95.4					<input checked="" type="checkbox"/>	11
R_Date Beta-1 69924 FJM415	652	821	95.4	679	734	95.4		97.9		96.1	<input checked="" type="checkbox"/>	12
R_Date SdOmw1	657	873	95.4	686	741	95.4		117.5		96.3	<input checked="" type="checkbox"/>	13
EruptionSdOmw1				692	747	95.4				96.9	<input checked="" type="checkbox"/>	14
▼ Phase SdOmw2											<input checked="" type="checkbox"/>	15
R_Date Beta-187067 031130C-3	644	775	95.4	701	760	95.4		74.5		98.4	<input checked="" type="checkbox"/>	16
R_Date Beta-185890 FJ-39-2	652	821	95.4	703	761	95.4		101.5		98.1	<input checked="" type="checkbox"/>	17
R_Date Beta-163318 011019C-2	671	880	95.4	704	760	95.4		122.2		98.4	<input checked="" type="checkbox"/>	18

Tableau 18: Tableau de sortie d'OxCal pour le modèle 700-1000 AD. Ce tableau comprend les dates modélisées et l'intervalle dans lequel elles sont comprises, un degré de confiance correspondant aux datations modélisées ainsi que l'indice d' « agreement » A et l'indice de convergence C (partie 2).

EruptionSdOmw2				723	770	95.4				97.8	<input checked="" type="checkbox"/>	19
R_Date SdKri	612	775	95.4	734	774	95.4		97.7		98.3	<input checked="" type="checkbox"/>	20
EruptionSdKri				738	780	95.4				98.2	<input checked="" type="checkbox"/>	21
▼ Phase SdKan											<input checked="" type="checkbox"/>	22
R_Date Beta-163322 1112C-1	606	877	95.4	749	791	95.4		109.4		98.7	<input checked="" type="checkbox"/>	23
R_Date Beta-173162 011202C-1	667	973	95.4	751	793	95.4		87.5		98.5	<input checked="" type="checkbox"/>	24
EruptionSdKan				764	798	95.4				98.9	<input checked="" type="checkbox"/>	25
R_Date SdOon	676	940	95.4	772	803	95.4		117.5		99.5	<input checked="" type="checkbox"/>	26
EruptionSdOon				781	803	95.4				99.5	<input checked="" type="checkbox"/>	27
C_Date SdTam	800	801	95.4	800	801	95.4		100		100	<input checked="" type="checkbox"/>	28
EruptionSdTam				799	813	95.4				99.1	<input checked="" type="checkbox"/>	29
R_Date SdTam	600	973	95.4	799	823	95.4		100.8		99.2	<input checked="" type="checkbox"/>	30
▼ Phase SdMzt											<input checked="" type="checkbox"/>	31
R_Date Beta-199184 FJ-60-1	674	884	95.4	803	829	95.4		124.5		99.4	<input checked="" type="checkbox"/>	32
R_Date Beta-199185 FJ-60-2	675	888	95.4	804	829	95.4		134.1		99.6	<input checked="" type="checkbox"/>	33
EruptionSdMzt				812	835	95.4				98.1	<input checked="" type="checkbox"/>	34
R_Date SdHum	703	976	95.4	815	842	95.4		126.4		99.4	<input checked="" type="checkbox"/>	35
EruptionSdHum				825	839	95.4				99.1	<input checked="" type="checkbox"/>	36
C_Date IzKt	838	839	95.4	838	839	95.4		100		100	<input checked="" type="checkbox"/>	37
R_Date Beta-173172 021108-04-6C obu	889	1120	95.4	835	892	95.4		1.4		99.7	<input checked="" type="checkbox"/>	38
	Warning! Poor agreement - A= 1.4%(A<= 60.0%)											
▼ Phase SdObu											<input checked="" type="checkbox"/>	39
R_Date Beta-163322 1129C-1	772	988	95.4	840	893	95.4		122.4		98.9	<input checked="" type="checkbox"/>	40



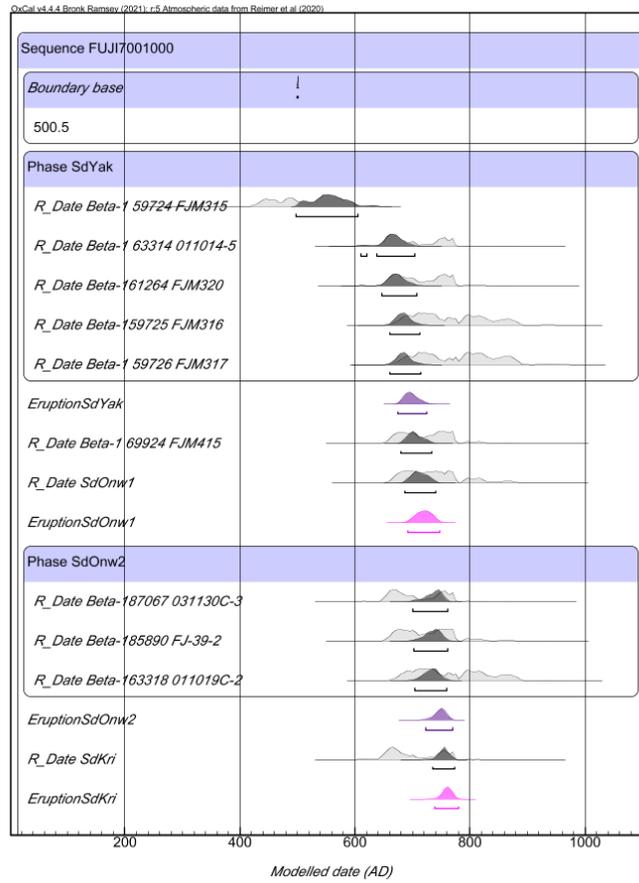


Figure 26: Multiple plot sorti d'OxCal pour le modèle 700-1000 AD. Ce graphique reprend tous les échantillons entrés dans OxCal pour créer le modèle statistique ainsi que les dates d'éruption calculées. Les échantillons sont associés avec leur densité de probabilité avant et après modélisation (partie 1).

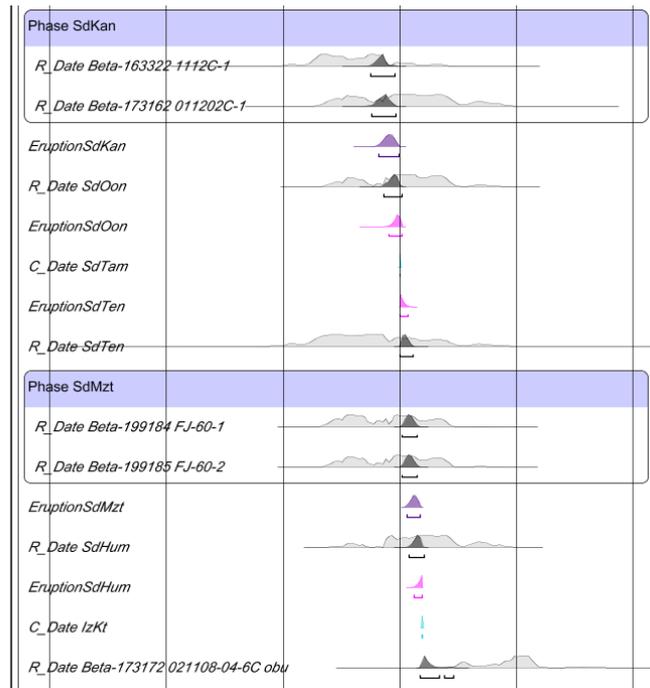


Figure 27: Multiple plot sorti d'OxCal pour le modèle 700-1000 AD. Ce graphique reprend tous les échantillons entrés dans OxCal pour créer le modèle statistique ainsi que les dates d'éruption calculées. Les échantillons sont associés avec leur densité de probabilité avant et après modélisation (partie 2).

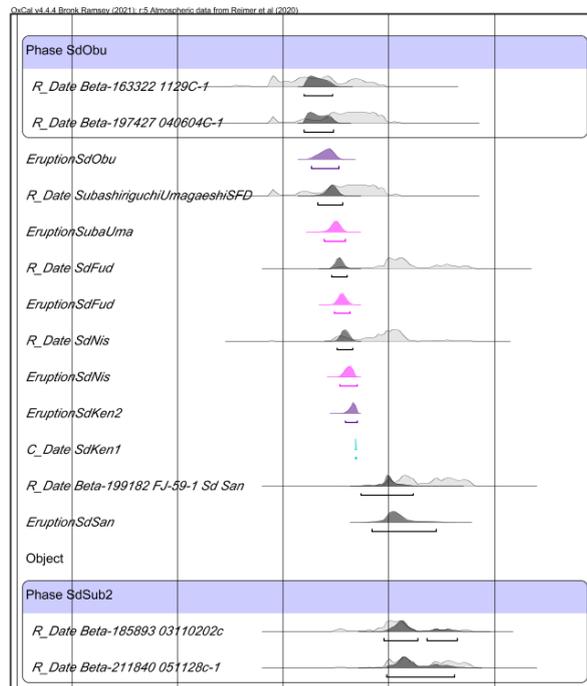


Figure 28: Multiple plot sorti d'OxCal pour le modèle 700-1000 AD. Ce graphique reprend tous les échantillons entrés dans OxCal pour créer le modèle statistique ainsi que les dates d'éruption calculées. Les échantillons sont associés avec leur densité de probabilité avant et après modélisation (partie 3).

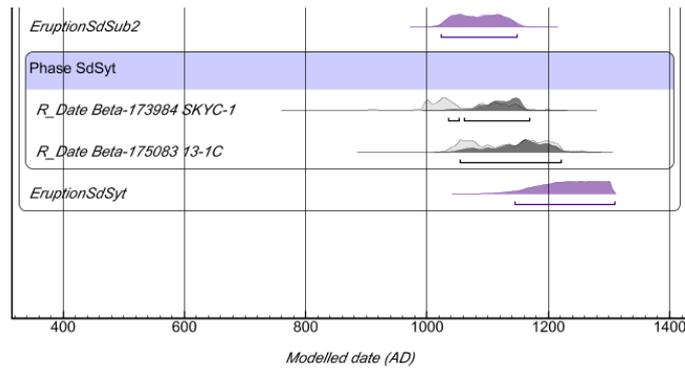


Figure 29: Multiple plot sorti d'OxCal pour le modèle 700-1000 AD. Ce graphique reprend tous les échantillons entrés dans OxCal pour créer le modèle statistique ainsi que les dates d'éruption calculées. Les échantillons sont associés avec leur densité de probabilité avant et après modélisation (partie 4).

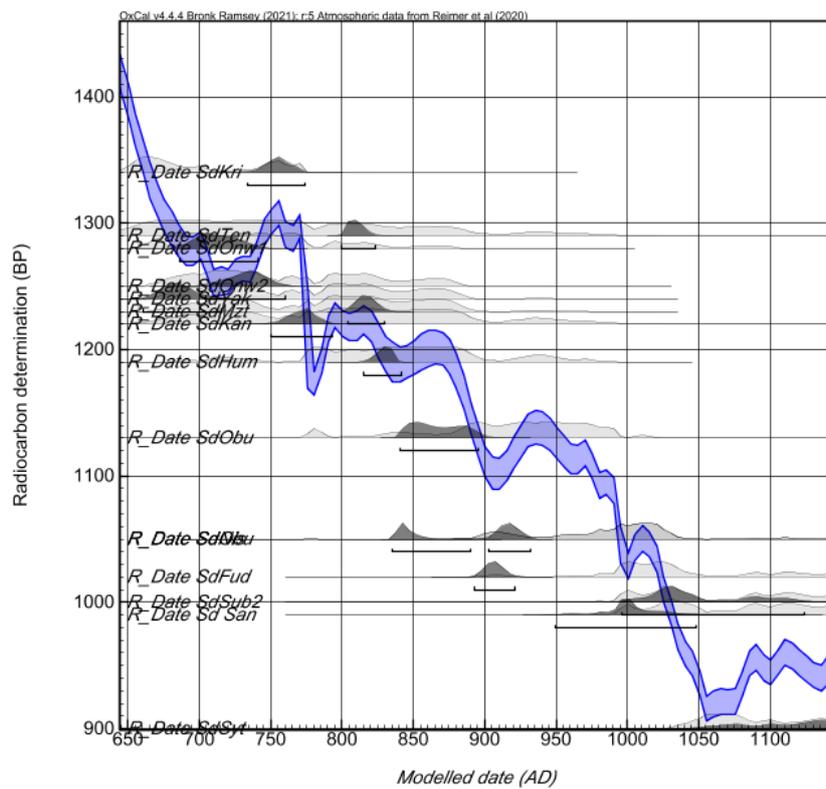


Figure 30 : Single Plot sorti d'OxCal représentant les datations utilisées dans le code par rapport à la courbe de calibration au carbone 14 IntCal20.