

# Première reconstruction de l'histoire éruptive depuis 20 000 ans des îles de Tidore et Ternate dans les Moluques du Nord (Indonésie) (rapport pour la bourse L.A.V.E de 2019)

Audrey FARAL

## Résumé

L'étude des éruptions passées offre une clé de compréhension unique du risque volcanique, notamment en Indonésie où chaque année se produisent des éruptions parfois meurtrières. C'est pourquoi, en s'inscrivant dans une démarche récente d'identification et de caractérisation des événements volcaniques passés, nous présentons la première reconstruction de l'histoire éruptive depuis 20 000 ans sur les îles de Ternate et Tidore (Moluques du Nord, Indonésie). Cette étude pluridisciplinaire (géomorphologie, téphrostratigraphie, sédimentologie, géochronologie, géochimie) a pour objectifs :

- (i) de comprendre les dynamiques des événements morphogènes passés par une étude géomorphologique ;
- (ii) de réaliser un premier continuum stratigraphique et chronologique à partir des dépôts volcaniques retrouvés sur un ensemble de douze coupes établies sur les îles de Ternate, Tidore et Maitara.

Les données sédimentologiques et géochimiques issues de l'étude stratigraphique ont permis de distinguer au moins quatre événements majeurs dans l'histoire éruptive des îles, depuis le dernier maximum glaciaire jusqu'à 2 500 BP. La datation des horizons pédologiques et la géochimie des téphras révèlent une première éruption caldérique du volcan Telaga (sur Tidore) datée aux alentours de 18 500/17 500 BP et dont le volume de téphras émis est estimé à 1 à 1,5 km<sup>3</sup> DRE (Dense Rock Equivalent). Vers 14 000/13 000 BP, une seconde éruption magmatique ponceuse serait associée au volcan Gamalama sur Ternate. S'ensuit une succession de dépôts pyroclastiques plus ou moins épais dont nous tentons d'établir l'origine. Entre 12 200 et 8 000 BP pourrait s'être produit une éruption pbréato-magmatique à l'origine de la formation du maar de Ngade (Ternate) et des dépôts plurimétriques de scories, de ponces et de cendres lités retrouvés sur l'ensemble des sites. Plus récemment dans la succession des événements, une éruption du volcan Kiematubu sur Tidore a été datée de 2 553 ± 24 BP. Les hommes n'avaient jamais relaté d'éruptions de ce volcan depuis leur présence dans la région à partir du XV<sup>ème</sup> siècle. Ainsi, cette étude amorce de manière exploratoire et inédite une première chronostratigraphie des grands événements éruptifs se déroulant dans cette région à partir de la fin du Pléistocène (dès 18 500 BP).

## Introduction

L'étude des éruptions passées offre une clé de compréhension du risque volcanique, notamment dans les régions d'Asie du Sud-Est où les volcans menacent constamment. L'évaluation du risque passe à la fois par la compréhension et la mesure de la vulnérabilité des enjeux et par la caractérisation de l'activité volcanique passée connue (Stieltjes, 2004).

Ces dernières décennies, les travaux sur l'impact des éruptions volcaniques passées se sont multipliés, notamment avec la récente identification du volcan Samalas à Lombok (Indonésie), à l'origine d'une des plus intenses éruptions de l'histoire en 1257 CE (Lavigne *et al.*, 2013), aux conséquences dévastatrices pour les sociétés du Moyen-Âge (Guillet *et al.*, 2017).

De ce fait, la maîtrise de l'aléa volcanique requiert une connaissance (i) des mécanismes éruptifs, (ii) des dynamiques de transports des matériaux émis, (iii) de l'évolution géomorphologique à plus ou moins long terme de l'édifice.

Il importe de comprendre et de connaître la nature et l'histoire de l'activité volcanique d'une région, afin de mieux évaluer les risques futurs, en particulier par l'évaluation de la récurrence des éruptions majeures. Ainsi, nous présentons la première reconstruction de

l'histoire éruptive depuis 20 000 ans sur les îles de Ternate et Tidore dans les Moluques du Nord (Indonésie), une région clé de l'histoire indonésienne qui a connu sa période de gloire il y a quelques siècles grâce au commerce des épices.

Ce travail s'intègre dans des études plus larges que sont l'identification et la caractérisation d'éruptions volcaniques explosives stratosphériques (ou non) ayant eu des impacts socio-économiques et climatiques locaux, régionaux voire globaux dans le passé, et pouvant être identifiées (pour les plus grosses) par des pics de sulfates dans les carottes glaciaires (Lavigne *et al.*, 2013; Vidal *et al.*, 2016, 2015).

Par ailleurs, l'intérêt de ces travaux est sociétal puisque les grands événements éruptifs destructeurs tels que l'éruption du Samalas en 1257, du Tambora en 1815, du Mont St Helens en 1980, du Pinatubo en 1991 (entre autres) peuvent se reproduire et impacter davantage d'individus. Malgré cela, peu d'études volcanologiques, stratigraphiques ou géomorphologiques ont été réalisées à ce jour sur les volcans de cette province, d'où le choix de ce terrain pour cette étude. De plus, par sa situation géodynamique, l'arc volcanique des Moluques du Nord concentre plusieurs calderas alignées du nord au sud, ainsi il paraît pertinent d'étu-

dier la dynamique passée de l'une d'elles, encore non datée.

Dans cette étude, il s'agira d'établir un premier cadre chronostratigraphique des événements éruptifs se déroulant sur les îles de Tidore et Ternate depuis la fin du Pléistocène jusqu'à l'Holocène récent.

Ainsi notre travail a pour objectifs :

(i) de comprendre les dynamiques des événements morphogènes passés par l'étude de la géomorphologie actuelle ;

(ii) de réaliser un premier continuum stratigraphique et chronologique à partir des dépôts volcaniques retrouvés sur un ensemble de douze coupes établies sur les îles de Ternate, Tidore et Maitara ;

(iii) d'estimer le niveau d'activité réel des volcans aujourd'hui considérés comme dormants voire éteints, que ce soit par les populations locales ou les autorités.

Après avoir présenté le contexte de la zone d'étude et la méthodologie employée dans ce travail, nous présenterons les premiers résultats des analyses sédimentologiques des paléosols et géochimiques des téphras. L'analyse des résultats couplée à l'étude et à la description stratigraphique permettent d'établir un ensemble d'interprétations et d'hypothèses quant au déroulement de l'histoire éruptive de la région. Dans ce rapport, trois grands événements volcaniques significatifs et impactant la région seront présentés. Cependant, la succession des couches stratigraphiques et le traitement statistique des résultats géochimiques permettront de mettre en évidence au moins sept événements volcaniques et/ou remaniement.

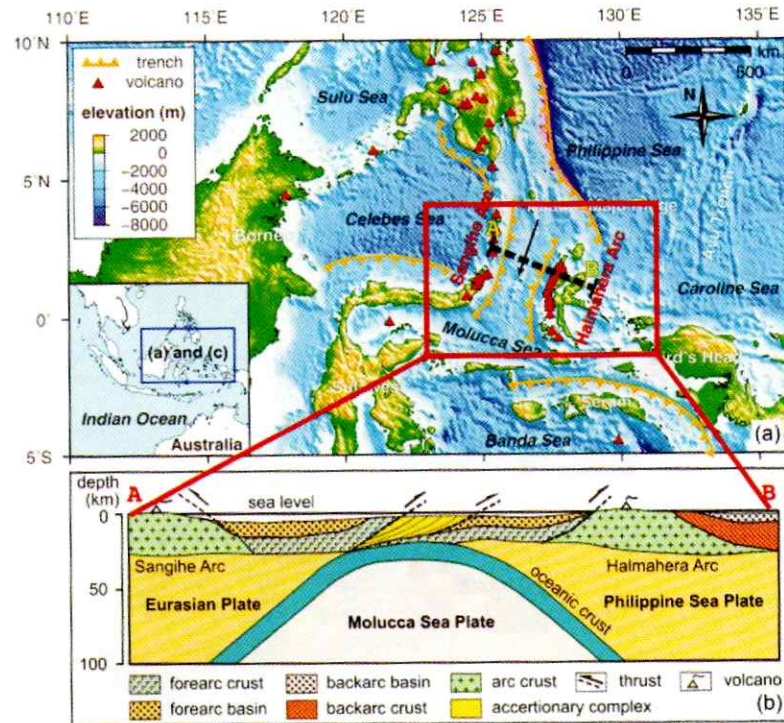
### Contexte de la zone d'étude

Le cadre tectonique particulier de la province des Moluques du Nord reflète la complexité de la géodynamique de la Ceinture de Feu, à laquelle appartient l'archipel indonésien, né de la subduction de la plaque indo-australienne sous les plaques eurasiatiques et Pacifique.

Au sein de cette dynamique globale, le jeu de la tectonique des micro-plaques s'exerce plus localement, comme dans le cas des Moluques du Nord. Ici, l'arc volcanique s'est formé au Néogène lors de la double subduction divergente arc-arc entre les plaques de l'arc de Sangihe et d'Halmahera (figure 1). La plaque de la mer des Moluques est subductée par ces deux plaques. Cette double subduction entraîne la création de deux arcs volcaniques, de part et d'autre des plaques, comme celui d'Halmahera, dont font partie les îles de Ternate et Tidore.

Cette géotectonique a deux conséquences majeures, à savoir une activité sismique intense (dernier séisme au large de Ternate le 14/07/2019) et une activité volcanique régulière, notamment celle du volcan Gamalama sur Ternate, dont l'activité est quasi annuelle.

Les îles de Ternate et Tidore (respectivement



**Figure 1.** (a) Carte de localisation des Moluques du Nord et (b) coupe transversale de la géotectonique locale : zone de double subduction divergente arc-arc (Zhang et al., 2017).

111 km<sup>2</sup> et 116 km<sup>2</sup>, figure 2), appartenant à l'arc volcanique Halmahera, se caractérisent géomorphologiquement par la présence de trois (i, ii, iii) grandes structures volcaniques résultantes de son ancienne activité :

(i) Les volcans Gamalama sur Ternate et Kiematubu sur Tidore, culminent respectivement à 1715 mètres et 1730 mètres. Comptant parmi les volcans les plus actifs d'Indonésie, le Gamalama est un stratovolcan, dont les pentes sont issues de l'empilement des coulées de lave et de dépôts pyroclastiques. Ainsi, au vu de ces nombreuses éruptions (plus de 80 depuis le XVI<sup>ème</sup> siècle, dont 20 depuis une vingtaine d'années) caractérisées par l'émission de téphras, il est difficile d'associer les dépôts observés (coulée de lave, ponces, cendres, blocs) à des dates précises d'éruptions. Le volcan Kiematubu à 1730 m sur Tidore considéré en sommeil ou inactif par les populations locales, n'a jamais fait l'objet d'éruptions relatées par les Hommes.

(ii) La caldera Telaga au nord de Tidore, dont les crêtes culminent à 500 m (figure 2), résulte de l'effondrement du sommet de l'édifice lors d'une éruption non étudiée et non datée à ce jour.

(iii) Sur Ternate, deux cratères de maars sont présents (figure 2) : le maar du nord-ouest, dénommé Tolire Besar, résulte d'une éruption phréatomagmatique en 1775 CE, décrite par les populations locales de l'époque (Bronto et al., 1982; Seriwawan et al., 2014). Le cratère de maar au sud-ouest de Ternate, nommé



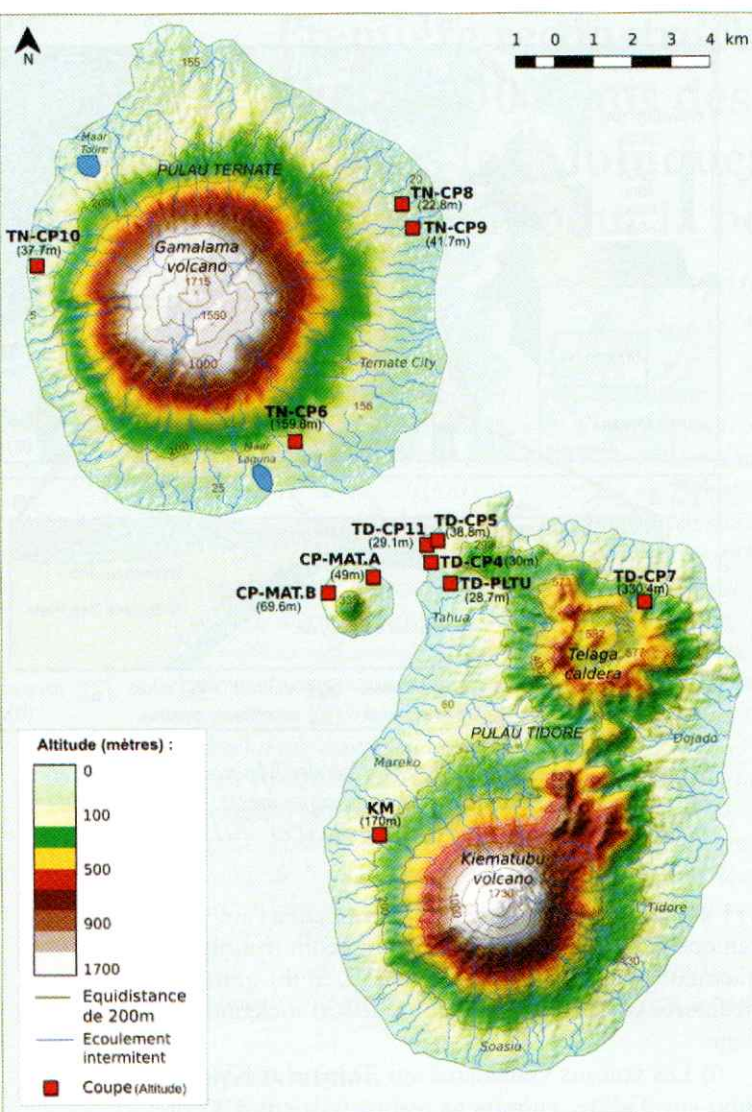


Figure 2. Carte de localisation des douze coupes sur les îles Ternate, Maitara et Tidore.

Ngade, n'a pas encore été daté.

Ainsi, l'histoire géomorphologique, en général, éruptive et sismique en particulier, n'est quasiment pas connue d'où l'intérêt d'étudier l'évolution paléo-environnementale de cette région insulaire pour établir un premier cadre chronostratigraphique des événements éruptifs se déroulant sur les deux îles.

### Méthodologie

Dans le cadre de ce mémoire, deux missions sur le terrain ont été effectuées, en août 2018 et en février 2019. Dans un premier temps, après avoir repéré sur GoogleMap la caldeira Telaga, Franck Lavigne s'est rendu sur les îles de Ternate et Tidore en août 2018. Il a succinctement décrit la base de quelques coupes et en partie échantillonné les dépôts de quatre affleurements : TD-PLTU, TD-CP4, TD-CP5 et TN-CP6 (figure 2). La seconde mission en 2019, à laquelle j'ai participé, a eu pour objectifs de compléter la descrip-

tion et la mesure des coupes, et de finir l'échantillonnage initial. Par ailleurs, il était nécessaire de compléter ces données par l'acquisition et la prospection de nouvelles coupes, notamment sur Ternate et sur Maitara (coupes TD-CP7, TD-CP11, CP-MAT.A, CP-MAT.B, TN-CP8, TN-CP9, TN-CP10, KM-CP, figure 2).

Chaque coupe a été abordée de la manière suivante : enregistrement du point GPS, observations générales (orientation, altitude, localisation par rapport à la caldeira), délimitation et description détaillée de chaque couche, mesure d'épaisseurs, échantillonnage des dépôts, photos. L'étude stratigraphique se limite au secteur nord-ouest de Tidore, à Ternate et au nord de Maitara ; le manque de temps sur place ne nous a pas permis de prospecter ailleurs, notamment à l'est de la caldeira Telaga.

Dans un second temps, à partir des données acquises *in situ*, des analyses en laboratoire ont été réalisées. D'une part, les couches décrites comme des horizons pédologiques ont été soumises à des analyses en perte au feu et au granulomètre laser, au Laboratoire de Géographie Physique (Meudon), afin de caractériser et connaître l'évolution et le temps de pédogénèse des sols. L'analyse en datation au radiocarbone par le laboratoire Direct-AMS (Seattle), selon la méthode de spectrométrie de masse couplée avec un accélérateur, a permis d'obtenir 17 échantillons datés de paléosols. D'autre part, les analyses multi-élémentaires par ICP-AES (10 éléments majeurs et mineurs analysés) et ICP-MS (44 éléments en traces analysés) ont été réalisées sur 29 échantillons de ponces anguleuses aux couleurs allant du blanc au gris foncé, ainsi que sur des scories grises. L'objectif de cette technique est de déterminer les caractéristiques géochimiques des téphras issus de plusieurs éruptions. La comparaison des concentrations en éléments chimiques des ponces permettra d'identifier et de regrouper les échantillons venant d'une même source et dans un second temps, d'émettre des hypothèses sur l'origine des téphras.

### Résultats

L'analyse stratigraphique *in situ* nous permet de construire un ensemble de douze logs stratigraphiques composés d'une alternance de couches de téphras (ponces, scories, cendres) et d'unités sablo-limoneuses, brun foncé, grumeleux et tassées interprétées dans un premier temps comme des horizons pédologiques (figure 3).

#### • Caractérisation des horizons pédologiques

L'analyse des horizons pédologique par la méthode de la perte au feu et la granulométrie laser permet de tirer trois observations générales :

(i) Les horizons pédologiques possèdent de faibles taux de matières organiques, avec une moyenne de 3,59 % et un taux de 6,24 % pour la plus forte concentration.



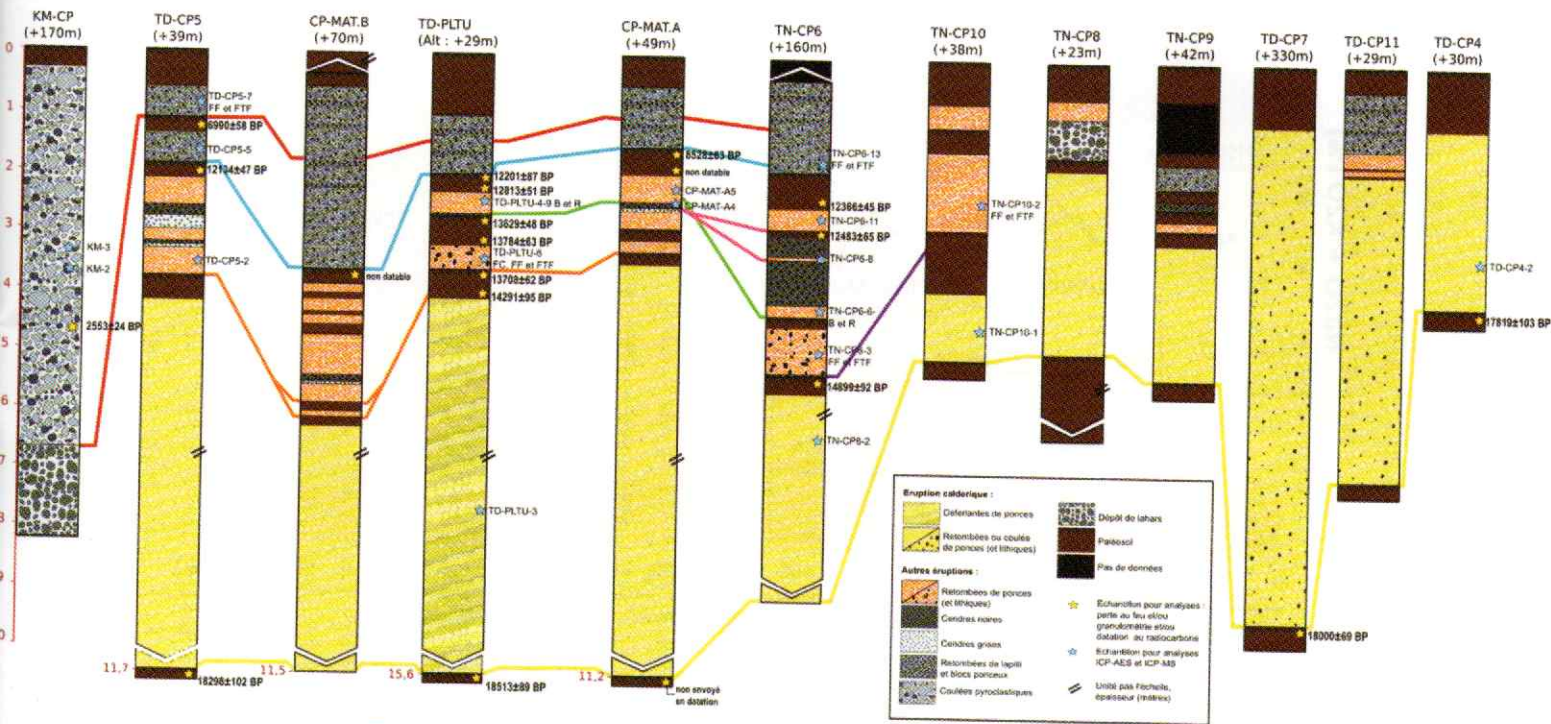


Figure 3. Logs stratigraphiques des dépôts sur Ternate, Tidore et Maitara.

(ii) La fraction limono-sableuse est dominante, représentant plus de 90% de la distribution granulométrique de tous les échantillons.

(iii) La concentration en fraction argileuse ne dépasse les 7,2% avec une moyenne de 5,3%.

Ces trois caractéristiques sont les propriétés d'un certain type de sols, des vitrosols, qui se développent sur un substrat volcanique comme leurs cousins les andosols. Contrairement à ces derniers, les vitrosols sont des sols dont le degré de maturité est inférieur à celui du développement des andosols, expliquant les faibles taux de matières organiques mesurés. Les vitrosols se caractérisent également par un faible taux d'argile (inférieur à 10%) et une part de fraction sableuse et limoneuse supérieure à 60% (Mathieu, 2009; Quantin, 1995). Pour caractériser avec certitude un paléosol appartenant au groupe des vitrosols, il aurait fallu connaître le taux d'allophanes (produits de l'altération des verres volcaniques), mesurer la densité de sol (comprise entre 0,9 et 1,2 pour les vitrosols, Quantin, 1995). Ainsi, les paléosols rencontrés sont des unités pédologiques jeunes et peu organiques, moins altérés où prédominent des particules grossières. Nous en concluons qu'il s'agit de sols qui n'ont pas eu le temps d'évoluer au cours du temps car recouverts par les dépôts d'éruptions volcaniques plus récentes.

Les résultats des datations au radiocarbone (figure 3) sont par ailleurs cohérents entre eux puisque la chronologie respecte la succession stratigraphique (des plus anciennes aux plus récentes dates de la base vers le haut de la coupe). La datation au radiocarbone des quatre paléosols prélevés au plus proche de l'unité

de ponce sus-jacente révèle des dates synchrones (tableau 3): respectivement  $18513 \pm 89$  BP,  $17819 \pm 103$  BP,  $18298 \pm 102$  BP,  $18000 \pm 69$  BP. Ces dates d'échantillons prélevés à la base des dépôts plurimétriques ponceux, retrouvés sur 11 coupes, permettent de mettre en évidence l'interruption de la pédogénèse par une éruption de forte magnitude il y a 20 500/17 500 ans. Le cadre chronostratigraphique (figure 3) des événements, lisibles à travers les coupes, s'étend donc depuis la fin du Pléistocène jusqu'à l'Holocène récent. L'étude des caractéristiques pédologiques permet de constater la rythmicité des événements éruptifs par l'interruption successive des dépôts sédimentaires.

#### • Caractérisation géochimique des téphras

La classification des roches magmatiques en fonction de leur teneur alcaline et de leur saturation en silice révèle que les échantillons appartiennent à trois groupes de roches: aux andésites et aux dacites pour la majorité des échantillons, aux basaltes pour trois d'entre eux (figure 4). La composition de ces échantillons appartient à une série subalcaline et plus précisément calco-alcaline, une géochimie de roches caractéristiques des zones de subduction de marge continentale ou d'arc insulaire (Beaux *et al.*, 2011).

La comparaison des concentrations géochimiques des 29 échantillons de ponces permet d'établir des corrélations entre certaines roches formant 7 groupes statistiques cohérents et concordants avec la stratigraphie des 12 logs (groupe A à G).

Trois représentations ont été nécessaires pour distinguer des regroupements statistiques au sein de la population des échantillons:



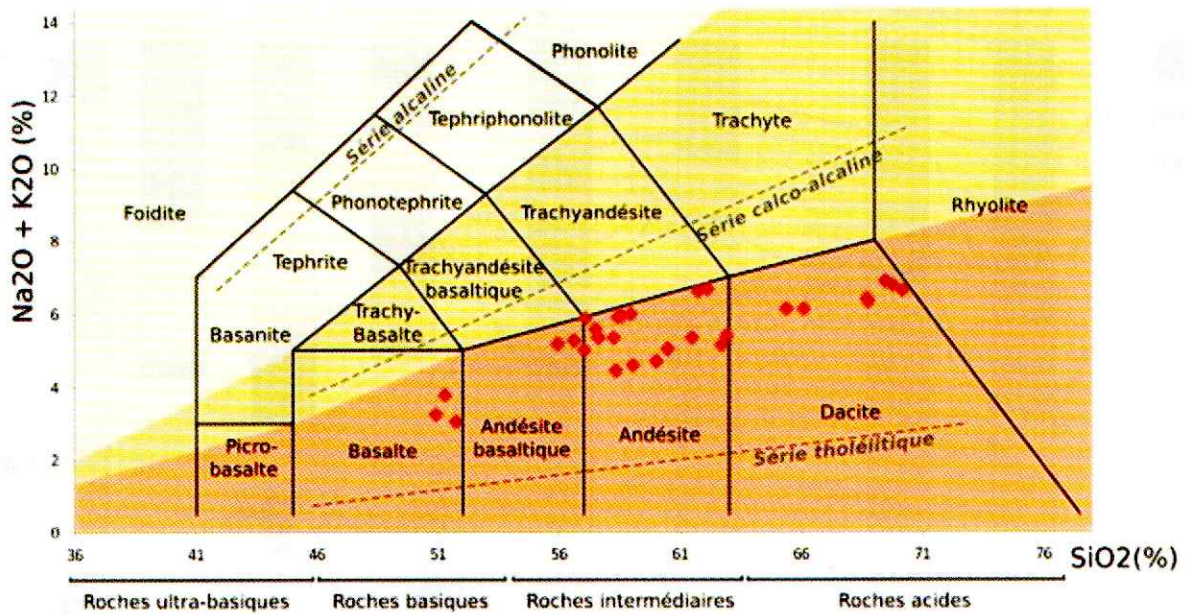


Figure 4. Diagramme TAS (Total alkali VS silica) des 29 échantillons de téphras échantillonnés sur 12 coupes localisées sur les îles de Ternate, Maitara et Tidore.

- (i) différenciation selon les minéraux alcalins ( $\text{Na}_2\text{O}$  et  $\text{K}_2\text{O}$ ) et alcalino-terreux ( $\text{Ca}_2\text{O}$ );
- (ii) distinction par un élément fluctuant et singulier à chaque éruption, le fer ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ );
- (iii) une différenciation des échantillons par l'utilisation des éléments en traces dits «immobiles» insensibles aux processus d'altération (éléments en traces Th, Nb, Rb, Zr, figure 5 et Pb, Sr, Zn, Y, non présents ici).

*Différenciation magmatique par les éléments  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  et  $\text{TiO}_2$*   
 Les différenciations magmatiques d'une éruption

à l'autre s'expliquent par la variation de certains éléments chimiques comme le fer, ici l'oxyde de fer ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), qui fluctue d'une éruption à l'autre pour un même volcan (McBirtney, 1968). La concentration en oxyde de fer est rapportée à la concentration en dioxyde de titane ( $\text{TiO}_2$ ) et en oxyde de potassium ( $\text{K}_2\text{O}$ ), ces derniers étant des composés chimiques dont la concentration n'évolue pas en fonction de l'altération et du lessivage de la roche (Chayes, 1964; Frick et Kent, 1984).

Les diagrammes ci-dessus (figure 5) mettent clairement en évidence quatre premiers groupes: le groupe A, B, C et D composés respectivement des 5,

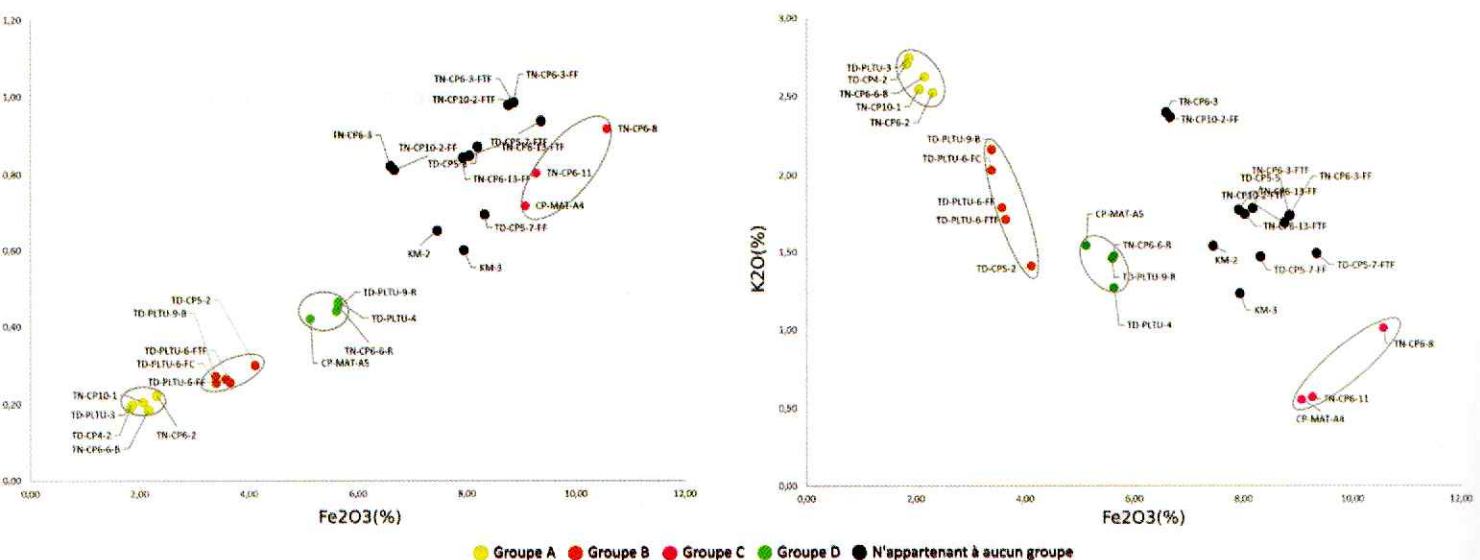


Figure 5. Taux de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  dans les échantillons rapporté à la concentration en pourcentage de  $\text{TiO}_2$  et  $\text{K}_2\text{O}$ .



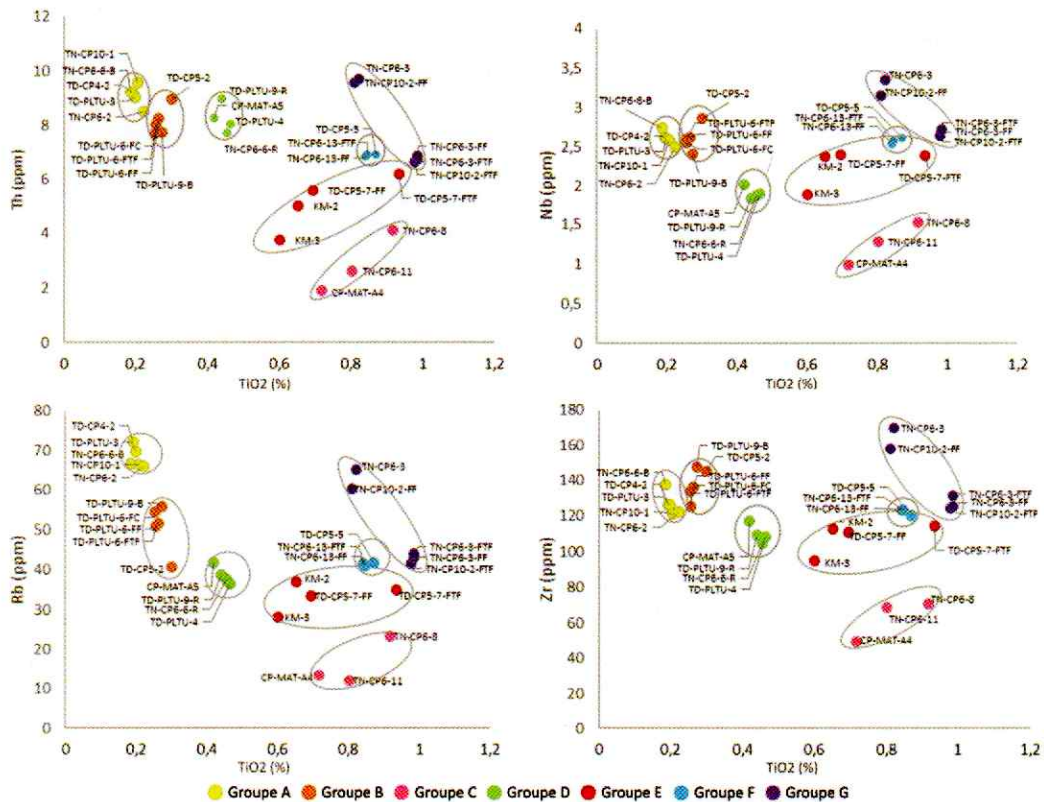


Figure 6. Concentration en  $TiO_2$  en fonction d'éléments immobiles : Th, Nb, Rb, Zr.

5, 3 et 4 mêmes échantillons. Ces 4 premiers regroupements sont valables et cohérents avec la position stratigraphique des couches et l'échantillonnage établi précédemment. Néanmoins, les échantillons n'appartenant pas aux groupes A, B, C, et D se concentrent et forment un grand groupe (échantillons en noir). Ces échantillons possèdent la même teneur en oxyde de fer. Pourtant, le but de cette analyse est de différencier les échantillons entre eux, or ce groupe est composé de la majorité des échantillons. Ce regroupement ne permet pas de discriminer une grande partie des échantillons.

#### *Différenciation magmatique par les éléments en traces dits « immobiles »*

Ces 8 éléments traces (Th, Nb, Rb, Zr dans la figure 6 et Pb, Sr, Zn, Y, non présentés ici) sont appelés « immobiles » car ils sont insensibles aux intempéries et aux processus d'altération et de métamorphisme; leur concentration n'évolue pas et reste la même depuis l'éruption (Chayes, 1964; Pearce et Cann, 1973). Ainsi, la concentration de ces éléments peut être considérée comme les « empreintes digitales » d'une éruption (Chayes, 1964; Frick et Kent, 1984; Morrison, 1978). Ces éléments sont rapportés à la concentration en dioxyde de titane ( $TiO_2$ ), qui n'évolue pas dans le temps et dont les teneurs autour de 0,2 à 1,2% correspondent à des environnements tectoniques actifs, notamment les convergences de plaques (Chayes,

1964; Frick et Kent, 1984; Tarling, 1981). Les 4 premiers groupes (A, B, C, D) se différenciaient déjà clairement dans les diagrammes selon un élément fluctuant et singulier, le fer ( $Fe_2O_3$ ) (figure 5).

Mais l'apport de ces derniers graphiques selon les traces immobiles (figure 6) permet de discriminer trois autres groupes en corrélant leurs dispositions statiques sur les diagrammes et la disposition stratigraphique des échantillons sur les logs. Ces derniers diagrammes selon les éléments immobiles sont les plus discriminants et laissent clairement apparaître les 7 groupes contrairement à la différenciation magmatique par les éléments  $Fe_2O_3$  et  $K_2O$  et  $TiO_2$  (figure 5).

#### **Interprétation**

La corrélation des regroupements statistiques des couches de téphras avec l'âge des sédiments permet d'établir une première chronologie des événements s'étant déroulés sur les îles de Ternate et Tidore. Dans le cadre de ce rapport, seulement trois grands événements seront présentés en lien avec les groupes géochimiques A, E et F.

#### **• L'éruption caldérique du volcan Telaga sur l'île de Tidore, il y a 18 500/17 500 BP**

Le regroupement statistique des échantillons de téphras a permis de discriminer, dès les premières représentations statistiques, le groupe de roches A, composé de 5 échantillons (groupe A, figure 6). La



similitude de la composition géochimique de ces roches et la cohérence stratigraphique permettent de prouver (en plus des observations visuelles), que ces dépôts sont issus d'une même éruption. Le début de l'éruption a par ailleurs été daté grâce aux horizons pédologiques à la base des coupes à 18 500/17 500 BP (figure 3). On associe les dépôts de cette éruption à la formation de la caldera Telaga sur Tidore. En effet, le volume soustrait à l'édifice ( $1,20 \pm 0,14 \text{ km}^3$  selon la modélisation de la reconstruction du Telaga par P. Lahitte et son logiciel Shapvolc) et les crêtes cicatricielles de l'effondrement du Telaga peuvent être corrélés à l'abondance des dépôts ponceux plurimétriques rencontrés aux alentours de la caldera.

Par ailleurs, des volcanologues tels que Verbeek (1883), Sparks (1929), Smith (1960) et Fouqué (1979) ont depuis longtemps confirmé le lien entre les éruptions pliniennes produisant du matériel pyroclastique en grande quantité et l'effondrement de l'édifice don-

nant lieu à la formation d'une caldera. En outre, notre hypothèse est confirmée par le fait que l'épaisseur des dépôts ponceux plurimétriques décroît en s'éloignant du volcan Telaga (figure 7).

Ainsi, il y a 18 500/17 500 BP, lorsque le volcan Telaga, culminant à environ 1210 mètres, entra en éruption, le niveau de la mer était 100 à 115 mètres plus bas, laissant émerger une seule et unique île, reliant Ternate, Maitara, Tidore et Halmahera. L'éruption, de 1 à 1,5  $\text{km}^3$  DRE (Dense Rock Equivalent) produisit deux sortes de dépôts observables aujourd'hui :

(i) au niveau des zones proximales et médianes, des déferlantes (TD-PLTU) et des coulées de ponces sont retrouvées sur Tidore et Maitara, jusqu'à 4 km du volcan Telaga ;

(ii) au niveau de la zone distale, simultanément ou consécutivement aux coulées de ponces, des retombées de ponces millimétriques à centimétriques bien triées se sont déployées jusqu'à au nord de Ternate, sur 1 mètre d'épaisseur. Pour autant, nous ne pouvons pas connaître l'extension spatiale maximale des retombées puisque la hausse du niveau marin à la fin du Pléistocène plongea les retombées de ponces sous l'eau.

La reconnaissance entre les coulées et les retombées de ponces a cependant été difficile à cause de la ressemblance des deux dépôts. Néanmoins, les dépôts de ponces bien triés sur Ternate, caractéristiques des retombées ainsi que l'impossibilité pour les coulées de traverser le détroit culminant -20/-25 mètres en dessous du niveau actuel (formant une vallée), permettent d'avancer que les coulées de ponces ne s'étendent pas au-delà du détroit. Par ailleurs, il est probable que le dôme présent actuellement sur Maitara ait été moins proéminent voire inexistant au moment de l'éruption, permettant aux coulées d'atteindre le nord-ouest de l'île de Maitara.

#### • Éruption phréato-magmatique à l'origine du maar Ngade (sud de Ternate) datée entre 12 200 BP et 8 000 BP

Les échantillons du groupe F sont présents sur 5 coupes (TD-CP5, CP-MAT. A et B, TD-PLTU, TN-CP6, figures 3 et 6), ils sont composés de lapilli et blocs centimétriques (< 3 cm), angulaires, gris foncé, mélangés à une matrice cendreuse. L'éruption à l'origine de ces dépôts peut être datée entre 12 200 et 8 000 BP grâce aux dates obtenues sur les horizons pédologiques qui encadrent ces dépôts.

Sur la figure 8, en haut des coupes, on observe des dépôts lités, noirs, peu cohérents composés de cendres fines, de lapilli, ainsi que de gros blocs creusant des figures d'impacts (figure 8, photo A.2). Ces dépôts projetés et laminés pourraient s'apparenter aux dépôts de l'éruption phréato-magmatique à l'origine de la formation du cratère de maar de Ngade au sud de Ternate.

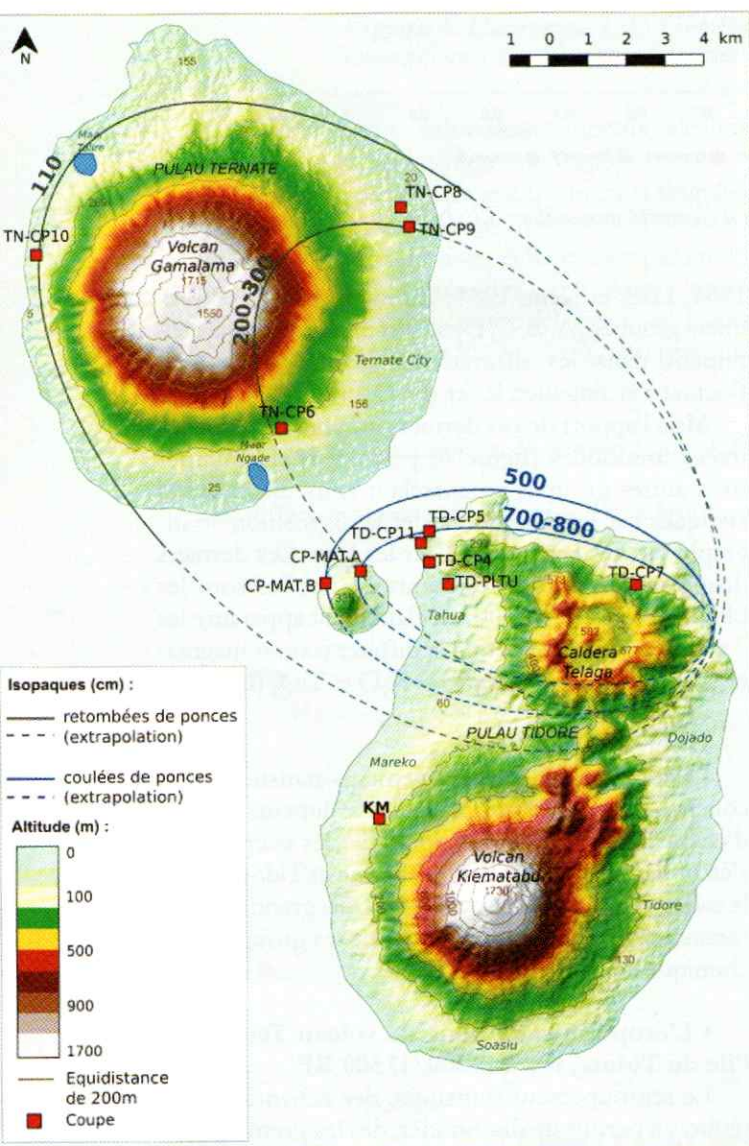
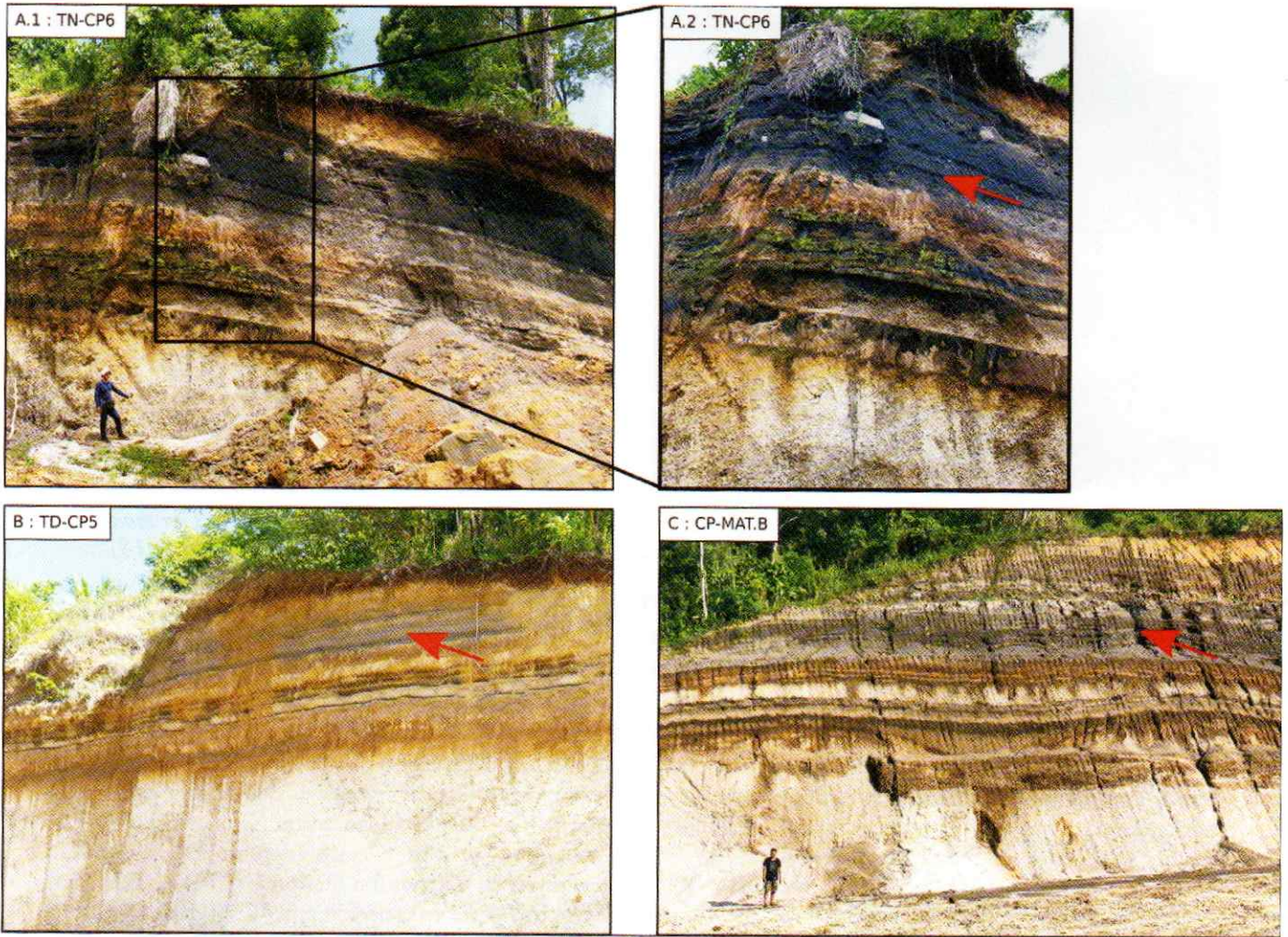


Figure 7. Carte d'isopaques des dépôts de l'éruption caldérique.





**Figure 8.** Photos des coupes TN-CP6, TD-CP5 et CP-MAT.B : la flèche rouge indiquant les dépôts plurimétriques de cendres, lapilli, bloc de roches appartenant au groupe géochimique F.

Les dépôts d'une éruption phréato-magmatique à l'origine d'un maar forment un anneau autour de la dépression circulaire. L'interaction du magma et de l'eau provoque des « base surge » (déferlante près du sol), dont le nuage de cendres et de gaz se déploie très rapidement pour atteindre plusieurs kilomètres. Les éjectas composés de lapilli et de blocs provenant du socle éruptif, se superposent formant un faciès lité, lequel est parfois creusé par des figures d'impacts. Le litage est une caractéristique des dépôts d'éruption phréato-magmatique et s'explique par la rythmicité des explosions courtes (Cas et Wright, 1987). À titre de comparaison, la figure 9 ci-contre présente le faciès des dépôts d'éruption phréato-magmatique pour deux maars (Alaska, Cameroun). On peut noter la similitude du litage avec les dépôts de Ternate et Tidore (figure 8, photo A.2).

L'épaisseur décroissante des dépôts depuis Ternate vers Maitara et Tidore semble coïncider avec l'hypothèse pour laquelle ces dépôts plurimétriques gris foncé seraient issus de l'éruption phréato-magmatique formant le maar de Ngade sur Ternate. Afin de confirmer que les échantillons du groupe F soient

issus de l'éruption phréato-magmatique, il serait nécessaire d'échantillonner et analyser la géochimie des roches à proximité du maar, dans la partie proximale des dépôts (mission prévue en février 2020).

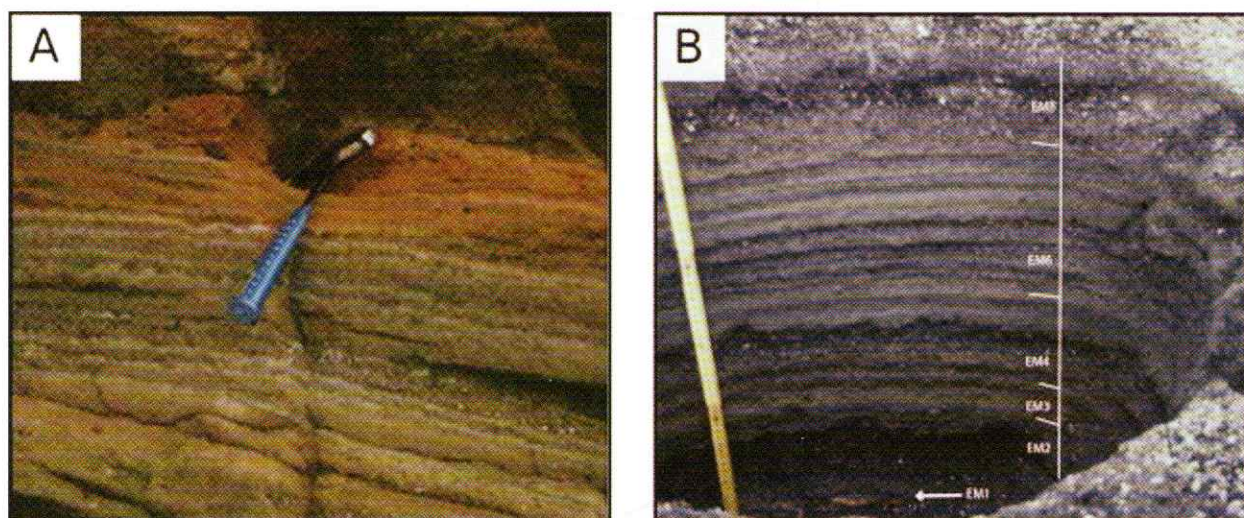
Par ailleurs, le volcan Gamalama pourrait également être à l'origine des dépôts puisque la géochimie des dépôts gris foncé et lités du groupe F est proche de celle du groupe G (figure 6), groupe associé dans nos hypothèses à ce volcan.

#### • Première éruption datée du volcan Kiematubu sur Tidore

Le groupe géochimique E est constitué des échantillons KM-2 et 3 et de TD-CP5-7 (FF et FT) (figure 6). Les dépôts de nuée ardente, dont sont issus les échantillons KM sur le flanc nord-ouest du volcan Kiematubu, ont été datés par un charbon de bois, prélevé à la base de la coulée, à  $2553 \pm 24$  BP (801/748 cal BCE).

Cette date constitue la première datation d'une éruption du volcan Kiematubu. Ainsi, les dépôts issus de l'éruption de  $2553 \pm 24$  BP peuvent être corrélés par la géochimie avec les dépôts de ponces de TD-





**Figure 9.** Dépôts d'éruption phréato-magmatique à l'origine de la formation de maar. A: dépôts du maar Debunsha au Cameroun (Ngwa et al, 2010). B: dépôts du maar Ukinrek en Alaska (Ort et al, 2018).

CP5-7, qui recouvrent un andosol dont la pédogénèse débute il y a  $6990 \pm 58$  BP (prélèvement à la base de l'andosol et non au contact avec l'unité suivante de ponces TD-CP5-7). Néanmoins, il ne peut être fait de corrélations plus détaillées avec les 12 coupes sans une analyse géochimique exhaustive des couches supérieures des coupes et la prospection de nouvelles coupes aux alentours du volcan Kiematubu.

### Conclusion

Ce mémoire de recherche s'inscrit dans des études plus larges que sont l'identification, la caractérisation, la compréhension d'événements volcaniques ravageurs ayant eu des impacts socio-économiques (ou non dans le cas ci-présent) et climatiques régionaux et mondiaux dans le passé, comme l'éruption du Samalau en 1257, du Tabora en 1815, du Mont St Helens en 1980, du Pinatubo en 1991, entre autres. Celles-ci sont amenées à se reproduire d'où l'intérêt d'étudier les dynamiques passées des éruptions volcaniques sur les îles Tidore et Ternate, qui à ce jour n'ont fait l'objet d'aucune étude scientifique sur cette thématique. Ainsi, cette étude avait pour objectif d'établir un premier continuum stratigraphique et chronologique à partir des dépôts volcaniques retrouvés sur un ensemble de 12 coupes établies sur les îles de Ternate, Tidore et Maitara.

Ce travail a permis de distinguer plusieurs événements éruptifs grâce aux croisements des données issues des regroupements statistiques géochimiques, de la datation des andosols et de l'étude stratigraphique :

1) l'éruption caldérique du volcan Telaga, datée aux alentours de 18 500/17 500 BP (20 500 et 19 500 cal BCE), a été mise en évidence par les dépôts plurimétriques de ponces retrouvés sur l'ensemble des sites. La modélisation réalisée peut nous laisser penser que la magnitude de l'éruption caldérique du Telaga

fut d'environ 1 à  $1,5 \text{ km}^3$  DRE (Dense Rock Equivalent).

2) Ce travail a permis de mettre en évidence la première éruption datée du volcan Kiematubu, il y a  $2553 \pm 24$  BP. Celui-ci n'avait jamais été l'objet d'éruptions liées par les hommes depuis leur présence à partir XV<sup>ème</sup> siècle. Néanmoins, nous ne pouvons pas affirmer à ce jour si cette éruption fut la dernière éruption du Kiematubu ou si ce dernier est une nouvelle fois entré en éruption entre 2 550 BP et le XV<sup>ème</sup> siècle.

Nous avons pu également émettre une hypothèse quant à la date de l'éruption phréato-magmatique à l'origine du maar de Ngade au sud de Ternate. En effet, les propriétés géochimiques similaires de deux dépôts sur Ternate et Tidore, le faciès lité des dépôts caractéristiques de ces éruptions ainsi que la datation des andosols supérieurs et inférieurs permettent de dater l'éruption phréato-magmatique entre 12 200 et 8 000 BP.

En outre, les regroupements géochimiques et la stratigraphie laissent penser que d'autres éruptions pliniennes se sont produites dans la région. Néanmoins, le manque d'étude stratigraphique et de données géochimiques sur les volcans de la région ne nous permet pas de faire des corrélations avec les dépôts de téphras retrouvés sur Ternate et Tidore et caractérisés géochimiquement par les analyses ICP réalisées dans cette étude.

Au vu des résultats, il serait nécessaire disposer de davantage de coupes stratigraphiques localisées de manière moins concentrées. En effet, les 12 coupes sont localisées seulement au nord-ouest de la zone étudiée. Pour de futurs travaux, il serait pertinent de prospecter des coupes au nord-est de la caldera, en direction d'Halmahera afin de connaître l'extension spatiale de l'éruption caldérique à l'est. Par ailleurs,



ayant identifié une première éruption datée du Kiematabu en  $2553 \pm 24$  BP, il serait nécessaire d'étudier les dépôts de cette éruption à proximité du volcan. En outre, la partie supérieure des 12 coupes présentées dans ce mémoire n'a pas fait l'objet d'étude et d'analyses (datation et géochimie) détaillées, à cause de l'accès difficile. La poursuite de ce travail permettrait de confirmer ou non la date hypothétique formulée dans ce mémoire pour l'éruption phréato-magmatique formant le maar, ainsi que de compléter et fournir davantage de précisions sur l'éruption du Kiematabu.

Dès lors, ce mémoire de recherche est un travail préliminaire et inédit quant à la reconstruction de l'histoire éruptive de la région. Il retrace et met à jour les grands événements éruptifs relatifs à une période de temps allant de la fin du LGM, il y a 18 500 BP jusqu'à 2 500 BP (20 500 cal BCE - 800 cal BCE) sur

Ternate et Tidore. La complexité et la valeur scientifique de cette étude reposent sur son caractère inédit, mais également sur le fait que les résultats concernent une échelle de temps long, ponctuée par plusieurs événements éruptifs inconnus et issus de volcans peu voire pas étudiés, et dont l'activité a évolué depuis la période étudiée. Ainsi, ce travail se poursuivra et portera sur l'étude de l'évolution des paysages des îles de Ternate et Tidore. Le but de ce projet sera d'une part, de reconstruire l'histoire paléo-environnementale pour identifier les grands événements morphogènes du passé des îles (séismes, éruptions, tsunamis, variation eustatique) et connaître les conséquences de ces événements sur les sociétés de l'époque; d'autre part, de contribuer au développement des îles par l'apport et la formulation de recommandations pour l'aménagement du territoire. □

### Bibliographie

- Beaux, J.-F., Fogelgesang, J.-F., Agard, P., Boutin, V., 2011. *Atlas de Géologie Pétrologie*. Dunod, Paris, France, 144 p.
- Bronto, S., Hadisantono, R., Lockwood, J., 1982. *Peta geologi Gunungapi Gamalama, Ternate, Maluku Utara*. Direktorat Vulkanologi, [Bandung Indonesia].
- Cas, R., Wright, J., 1987. *Volcanic successions: Modern and Ancient: A geological approach to processes, products and successions*. Chapman & Hall, 528 p. <https://doi.org/10.1007/978-0-412-44640-5>
- Chayes, F., 1964. *A petrographic distinction between Cenozoic volcanics in and around the open oceans*. J. Geophys. Res. 69, 1573-1588. <https://doi.org/10.1029/JZ069i008p01573>
- Frick, C., Kent, L.E., 1984. *Drift pumice in the Indian and South Atlantic Oceans*. South African J. Geol. 87, 19-33.
- Guillet, S., Corona, C., Stoffel, M., Khodri, M., Lavigne, F., Ortega, P., Eckert, N., Sielenou, P.D., Daux, V., Churakova (Sidorova), O.V., Davi, N., Edouard, J.-L., Zhang, Y., Luckman, B.H., Mygland, V.S., Guiot, J., Beniston, M., Masson-Delmotte, V., Oppenheimer, C., 2017. *Climate response to the Samalas volcanic eruption in 1257 revealed by proxy records*. Nat. Geosci. 10, 123-128. <https://doi.org/10.1038/ngeo2875>
- Lavigne, F., Degeai, J.-P., Komorowski, J.-C., Guillet, S., Robert, V., Lahitte, P., Oppenheimer, C., Stoffel, M., Vidal, C.M., Surono, Pratomo, I., Wassmer, P., Hajdas, I., Hadmoko, D.S., de Belizal, E., 2013. *Source of the great A.D. 1257 mystery eruption unveiled, Samalas volcano, Rinjani Volcanic Complex, Indonesia*. Proc. Natl. Acad. Sci. 110, 16742-16747. <https://doi.org/10.1073/pnas.1307520110>
- Mathieu, C., 2009. *Les principaux sols du monde*. Editions Lavoisier, Paris, France, 260 p.
- McBirtney, 1968. *Petrochemistry of the cascade andesite volcanoes, Andesite Conference Guidebook*. Hollis M. Dole State Geologist, Oregon, USA, 101-107.
- Morrison, M.A., 1978. *The use of « immobile » trace elements to distinguish the palaeotectonic affinities of metabasalts: applications to the Paleocene basalts of Mull and Skye, Northwest Scotland*. Earth Planet. Sci. Lett. 39, 407-416. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(78\)90029-8](https://doi.org/10.1016/0012-821X(78)90029-8)
- Pearce, J.A., Cann, J.R., 1973. *Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analyses*. Earth Planet. Sci. Lett. 19, 290-300.
- Quantin, P., 1995. *Andosols et vitrisols, Référentiel Pédologique INRA*. Institut National de la Recherche Agronomique, Techniques et Pratiques Editions, 93 p.
- Setiawan, F., Wibowo, H., Santoso, A.B., Nomosatryo, S., Yuniarti, I., 2014. *Karakteristik danau asal vulkanik; Studi kasus Danau Tolire, Pulau Ternate*. Limnologi-Perairan Darat Trop. di Indones. 21, 103-114.
- Stieltjes, L., 2004. *Analyse du risque volcanique: Etat de l'art sur l'aléa volcanique*. Rapport BRGM/RP-53006-FR. 62 p.
- Tarling, D., 1981. *Orogenic Andesites and Plate Tectonics, James Hill*, in: Geophysical Journal International. Springer-Verlag, Berlin, p. 581-582. <https://doi.org/10.1093/gji/73.2.581-a>
- Vidal, C.M., Komorowski, J.C., Métrich, N., Pratomo, I., Kartadinata, N., Prambada, O., Michel, A., Carazzo, G., Lavigne, F., Rodysill, J., Fontijn, K., Surono, 2015. *Dynamics of the major plinian eruption of Samalas in 1257 A.D. (Lombok, Indonesia)*. Bull. Volcanol. 77. <https://doi.org/10.1007/s00445-015-0960-9>
- Vidal, C.M., Métrich, N., Komorowski, J.-C., Pratomo, I., Michel, A., Kartadinata, N., Robert, V., Lavigne, F., 2016. *The 1257 Samalas eruption (Lombok, Indonesia): the single greatest stratospheric gas release of the Common Era*. Sci. Rep. 6, 34868. <https://doi.org/10.1038/srep34868>