

Université Toulouse II Jean Jaurès

Master 2^e année GAED parcours DYNEM



Entre volcanisme magmatique et volcanisme sédimentaire : l'éruption du LUSI en Indonésie. Un exemple de gestion d'événement catastrophique lié à un aléa méconnu

Mathieu HUYEZ

Sous la direction de Monsieur Emmanuel CHAPRON

Soutenance le 23 Juin 2021

Composition du jury :

Monsieur Jean-Marc ANTOINE, Maître de Conférences, Université Toulouse II Jean Jaurès,
examineur

Monsieur Emmanuel CHAPRON, Professeur des Universités, Université Toulouse II Jean Jaurès,
directeur de mémoire

Monsieur Dominique LAFFLY, Professeur des Universités, Université Toulouse II Jean Jaurès,
examineur

Figure de couverture : Vue aérienne sur les boues fumantes au centre du *Lumpur Sidoarjo* (LUSI), dans la province de Java oriental, avec en arrière-plan le complexe volcanique magmatique de l'Arjuno-Welirang (vue nord-est/sud-ouest) — © Oystein Lund Andersen, février 2017

REMERCIEMENTS

Toute descente dans les profondeurs que constitue le travail de recherche nécessite accompagnateurs et éclaireurs avisés. En premier lieu, ce mémoire n'aurait pu naître sans le soutien et la confiance que m'a accordés mon directeur, Emmanuel Chapron, à qui j'exprime toute ma gratitude. Ses conseils, à la fois rigoureux et empathiques, m'ont guidé à travers les entrailles de cette expédition laborieuse mais ô combien passionnante, venant parachever une année de défi personnel de reprise d'études. Ses recommandations m'ont mené à croiser le chemin de Francis Odonne, dont les savoirs sur le sujet que j'ai choisi m'ont enthousiasmé davantage. Je lui suis reconnaissant pour les informations qu'il m'a fournies, et le précieux entretien qu'il m'a accordé, me permettant de voyager au coeur des *mud volcanoes*.

Une telle exploration nécessite également un environnement favorable et bienveillant pour s'y préparer. J'adresse ainsi mes chaleureux remerciements à celles et ceux qui m'entourent. A mes plus proches, toujours présents sur les sentiers, pour leur doux et infaillible appui dans cette aventure, Marie-Hélène, Alain, Alexandre et Hanaëlle. A ma bonne fée, Rose-Lyne, qui aide à voir par-delà les brumes volcaniques.

Enfin, je remercie les membres du jury pour la curiosité dont ils font preuve, en acceptant de lire et d'examiner ce mémoire. Leurs remarques et conseils me seront utiles afin de rendre encore plus motivant et exigeant mon travail.

SOMMAIRE

INTRODUCTION.....	5
PREMIÈRE PARTIE - QUELLE PLACE ATTRIBUER AU LUSI DANS LA CLASSIFICATION DES STRUCTURES VOLCANIQUES TERRESTRES ? MISE EN PARALLÈLE DES SYSTÈMES VOLCANIQUES MAGMATIQUES ET SÉDIMENTAIRES.....	11
CHAPITRE 1 Une apparente similarité de formes à la surface.....	12
CHAPITRE 2 Des alimentations profondes différenciées.....	27
CHAPITRE 3 Le cas du LUSI : un système hybride ?.....	38
CONCLUSION DE LA PREMIÈRE PARTIE <i>Le LUSI, un événement volcanique à part</i>	47
DEUXIÈME PARTIE - DE LA COMPRÉHENSION SCIENTIFIQUE AUX IMPLICATIONS SOCIÉTALES DU LUSI : LES FORMES DE GESTION TERRITORIALE D'UNE CATASTROPHE IMPRÉPARÉE S'INSCRIVANT DANS LA DURÉE....	49
CHAPITRE 1 Un aléa encore mal cerné par les scientifiques.....	51
CHAPITRE 2 La catastrophe dans l'espace-temps : Réduire une crise aux contours spatio-temporels mouvants.....	59
CHAPITRE 3 Faire face au désastre : les réponses des acteurs dans la dynamique de résilience du territoire.....	72
CONCLUSION DE LA DEUXIÈME PARTIE <i>Résilience systémique : panarchie et « vulnérabilité résiliençaire » dans le territoire faisant face à l'éruption du LUSI</i>	86
CONCLUSION.....	91
RÉFÉRENCES.....	95
ANNEXES.....	100
TABLE DES FIGURES.....	106
LISTE DES TABLEAUX.....	108
LISTE DES ANNEXES.....	108
TABLE DES MATIÈRES.....	109

INTRODUCTION

Le 27 août 1886, un violent séisme d'une magnitude estimée à 8,4 sur l'échelle ouverte de Richter, dont l'épicentre est situé à quelques encablures de l'île de Zante en mer Ionienne, ébranle la région du Péloponnèse pendant plus de quarante secondes. Plusieurs observateurs sillonnant le secteur à ce moment-là, et notamment l'équipage du navire *La Valette* avec son capitaine L. Aquilina, rapportent avoir aperçu, une demi-heure après la secousse, une épaisse fumée noire parfois rougeoyante s'élevant de l'horizon ainsi que, plus tard, des rayures sombres teintées de jaune, dans l'eau, à faible profondeur¹. Ce sont même des flammes que le commandant du bateau à vapeur *Transition* affirme avoir vues. Ces témoignages ont corroboré la thèse de la présence d'un volcan sous-marin, lequel apparaît alors sur la carte bathymétrique de M. PFANNENSTIEL en 1960. Or, les campagnes de relevés postérieures mettent en évidence une dépression profonde de 4000 m. à l'emplacement supposé du « Ionischer Vulkan A1 »². De même, les prélèvements par carottage dans le secteur montrent que l'ensemble des jeunes couches de téphra analysées dans les sédiments sont rattachées à des éruptions terrestres, excluant de fait toute preuve d'éruption magmatique en provenance du fond de la mer Ionienne. Le scientifique allemand W. HIEKE arrive alors à l'hypothèse d'une éruption par volcanisme sédimentaire, lequel est fréquent dans le prisme d'accrétion que représente la crête méditerranéenne traversant cette zone. La couleur jaune des stries observées correspondraient aux particules de sédiments ainsi libérés, et les flammes seraient à mettre en rapport avec l'ignition des fortes émissions de gaz, bien que cela soit rare en eaux profondes³.

Cet exemple est révélateur de la contrariété qui existe entre le volcanisme magmatique et le volcanisme sédimentaire, appelé également volcanisme de boue. Leurs manifestations respectives présentent en effet d'apparentes similarités qui peuvent porter l'observateur à la confusion entre ces deux types de systèmes géomorphologiques, et qui se retrouvent dans la terminologie employée : éruption, épanchements de fluides, émanations de gaz,... Les formes qu'ils prennent à la surface de la Terre participent aussi de cette association ainsi faite, à l'instar des cratères visibles et comparables pour chacun de ces types de volcans, tandis que leurs mécanismes internes diffèrent davantage. Cette assimilation peut également résulter d'une certaine méconnaissance des volcans

¹ « The mate, who was on watch on the bridge, reported to me that he had observed in the sea several stripes of a dark yellowish colour about one quarter of a mile long in the direction from north to south, which looked like shallow » in HIEKE, W., « The August 27, 1886 earthquake in Messenia (Peloponnesus) and reported flames over the Ionian Sea — a Mediterranean Ridge gas escape event? », *Marine Geology*, n°207 (2004), p. 261-264

² HIEKE, W., *op.cit.*, p. 259-260

³ *Ibid.*, p. 262-263

de boue (ou *mud volcanoes*). Pourtant, ils seraient observés depuis l'Antiquité⁴, décrits par Pliny l'Ancien au I^{er} siècle de notre ère dans son ouvrage *Naturalis Historia*, même si les mécanismes qui sous-tendent le phénomène sont alors inconnus. Dès le début du XX^e siècle, de nombreux forages ont lieu autour des volcans sédimentaires d'Azerbaïdjan car le lien entre leur manifestation et la présence d'hydrocarbures est déjà fait et intéresse l'activité industrielle⁵. C'est leur proximité avec les champs pétrolifères qui a porté l'intérêt des premières études pour ces types de volcans, avec par exemple les travaux de S.F. FEDOROV et I.M. GOUBKIN dans l'URSS de Staline cherchant, dès 1938, la connexion entre ces ressources naturelles et ces émanations géologiques, en Crimée. Les *mud volcanoes* constituent d'ailleurs une expression spécifique d'écoulement à la surface terrestre de fluides, provenant de bassins sédimentaires riches en hydrocarbures « avec ou sans intérêt commercial »⁶. La connaissance de ce phénomène s'enrichit depuis les années 1970 par les recherches dont il fait l'objet, cependant que le dénombrement des volcans de boue se poursuit, notamment par l'exploration des fonds marins, traduisant une volonté de mieux appréhender ce volcanisme. L.I. DIMITROV en répertorie 900 subaériens pour 800 sous-marins⁷. G. ETIOPE a avancé le nombre de 926 en 2004 pour les *mud volcanoes* terrestres, avant de réviser ce chiffre à 652 documentés en 2015, auxquels s'ajoutent 300 en milieu maritime peu profond⁸, tandis que le total des volcans de boue sous-aquatiques est évalué entre 10³ et 10⁵ par A.V. MILKOV⁹. Ces données montrent la difficulté à la fois de localiser ces structures, notamment en milieu maritime, et de répertorier celles qui correspondent réellement aux mécanismes du volcanisme sédimentaire. En effet, les *mud volcanoes* sont parfois confondus avec d'autres manifestations boueuses de surface qui résultent de processus géologiques différents¹⁰, notamment paravolcaniques, à l'instar des mofettes, événements par lesquels s'échappent principalement du gaz

⁴ DIMITROV, L.I., « Mud volcanoes—the most important pathway for degassing deeply buried sediments », *Earth-Science Reviews*, n°59 (2002), p. 50

⁵ DIMITROV, L.I., *op. cit.*, p. 59

⁶ « Mud volcanoes are surface expressions of focused fluid flow inside hydrocarbon-bearing sedimentary basins. They are a specific category of hydrocarbon seeps, connected hydraulically to petroleum (natural gas and oil) rich sediments and accumulations, which may or may not have commercial importance » in MAZZINI, A., ETIOPE, G., « Mud volcanism : an updated review », *Earth-Science Reviews*, n°168 (2017), p. 82

⁷ DIMITROV, L.I., *op. cit.*, p. 54

⁸ Il est important de noter ici que le lac Baïkal est la seule étendue limnique contenant des *mud volcanoes*, une dizaine, toutes les autres structures subaquatiques connues de ce type sont en milieu marin, d'après CUYLAERTS, M., et al., « Distribution and morphology of mud volcanoes and other fluid flow-related lake-bed structures in Lake Baikal, Russia », *Geo-Marine Letters* (2012), p. 384-385

⁹ MAZZINI, A., ETIOPE, G., *op. cit.*, p. 85

¹⁰ *Ibid.*, p. 83

carbonique, ou encore des solfatares pouvant créer des marmites de boue argileuse que des scientifiques eux-mêmes ont pu à tort assimiler lexicalement à des volcans de boue¹¹.

Aussi, les *mud volcanoes* constituent-ils encore pour les scientifiques un phénomène qualifié par A. MAZZINI d'« intrigant », impliquant des recherches tant dans le domaine de l'exploitation énergétique, que de la géologie, mais peu dans celui des risques liés à leurs rejets de fluides, surtout gazeux. Les volcans sédimentaires, malgré leur présence certaine à travers la planète, semblent se manifester de façon assez discrète. Les risques connexes à cet aléa paraissent faibles. Lorsque les volcans de boue sont localisés près de zones habitées, un danger potentiel non-négligeable pour les populations est présent, mais les cas sont rares et concernent des espaces restreints. Ainsi du Piparo sur l'île de Trinidad, avec une périodicité d'éruption d'environ 22 ans, et dont le réveil en 1968 ou encore en 1997 a conduit à la destruction de maisons par projections de boue, toutefois sans dommages humains¹². Certains enjeux économiques ont pu être également menacés, à l'instar de l'événement relaté par F. ODONNE¹³ (cf. **Annexe I**) du terminal pétrolier azéri de Sangatchal s'étant trouvé sur la trajectoire d'une coulée boueuse de l'Otman-Bosnag, laquelle s'est arrêtée à quelques dizaines de mètres de l'infrastructure, dans les années 2010 (voir carte de localisation en **figure 2**, p. 17).

La catastrophe la plus représentative du volcanisme sédimentaire, et sans précédent par son ampleur, prend place en Indonésie, à l'est de l'île de Java, à partir du 29 mai 2006. C'est là qu'est né ce qui s'apparente à un volcan de boue, offrant aux scientifiques l'opportunité rare d'étudier ce phénomène dès son émergence, mais affectant directement la vie de dizaines de milliers d'habitants. En effet, une douzaine de villages ont été ensevelis dans le département affecté par l'éruption, et les flots boueux poursuivent leur épanchement quinze années plus tard, à un rythme qui atteint encore parfois les 60 000 m³/jour¹⁴, contenus tant bien que mal par des digues.

¹¹ « Les solfatares (...) sont des **volcans de boue** produits par de la vapeur surchauffée entre 100 et 300 degrés et d'autres gaz » in TAZIEFF, H., DERRUAU, M., *Le volcanisme et sa prévention*, Masson, Paris (1990), p. 83. Le terme de « volcans de boue » est inapproprié ici, les boues des **solfatares** n'étant **pas** en effet **d'origine sédimentaire**, mais résultant de la dissolution de matériaux volcaniques magmatiques (lapillis, cendres,...) par réaction chimique avec les gaz expulsés, chargés notamment de soufre.

¹² DEVILLE, E., GUERLAIS, S.-H., « Cyclic activity of mud volcanoes : evidences from Trinidad (SE Caribbean), *Marine and Petroleum Geology*, n°26 (2009), p. 1683-1684

¹³ « L'Otman-Bosnag... C'est celui qui est au-dessus du terminal de Sangatchal, et qui fait aussi des coulées qui ont inquiété les gens, la coulée s'est arrêtée à quelques dizaines de mètres des cuves de pétrole et gaz ».

Propos recueillis auprès de Francis ODONNE, professeur émérite en géologie et sédimentologie. Entretien du 18 mai 2021 (cf. extraits en **Annexe I**).

¹⁴ BADJA PRATAMA, B. et al., « Addressing the environmental risk from the mudflow disaster in Sidoarjo », *E3S Web of Conferences* 74, 12003 (2018), p.1

Baptisé « LUSI » par la combinaison de « *lumpur* » (boue en Indonésien) et « *Sidoarjo* » (toponyme du district concerné)¹⁵, sa dénomination traduit l'aspect le plus visible de cette manifestation géologique : l'écoulement de matières boueuses. Pourtant, les chercheurs ne sont pas unanimes quant à la pertinence de qualifier ce phénomène de *mud volcano*. D'aucuns tendent à démontrer le caractère hybride de la structure ayant conduit à l'affleurement du LUSI, à mi-chemin entre le volcanisme sédimentaire et le volcanisme magmatique classique, s'apparentant davantage à un sous-type de SHGS (*Sediment-Hosted Geothermal System*)¹⁶. Les aléas que constituent les émanations et projections du LUSI ont abouti dans ce territoire à une catastrophe inattendue que les différents acteurs, substantiellement impréparés, ont dû apprendre à gérer en incluant les rythmes des débats et des avancées liés à la compréhension scientifique sur l'origine et les mécanismes de ce phénomène.

L'expression de « catastrophe » doit cependant être questionnée dans ce contexte. En effet, lorsque l'échelle des impacts est davantage locale, certains auteurs invitent à employer plus particulièrement la notion de « désastre »¹⁷ plutôt que celle de catastrophe. Considérant leurs points communs en terme de désignation d'impacts spatio-temporels sur des unités sociales ou environnementales, et les types comparables de réponses à leurs effets¹⁸, les termes de « catastrophe » et « désastre » seront toutefois utilisés en synonyme équivalent dans le développement, jusqu'à ce que l'étude puisse révéler l'ampleur spatiale réelle de l'éruption du LUSI et les imbrications scalaires qui en découle. Quant à la notion de phénomène « méconnu », elle interroge le caractère « évident de l'aléa »¹⁹ : chaque danger naturel a en effet une histoire scientifique et sa caractérisation dépend des investissements dont il fait l'objet, de l'intérêt que les études lui portent, posant par exemple la question de la nature, soit « nouvelle », soit simplement encore peu ou non explorée, d'un phénomène comme le LUSI.

¹⁵ BOSNAK, J.E., « Soap Opera and Muddy Affairs in Indonesia : The Cultural Politics of the Lapindo Mudflow Case (2006-2014) », *Bijdragen tot de Taal-, Land- en Volkenkunde*, vol. 171, n°4 (2015), p. 456

¹⁶ MAZZINI, A., « 10 years of Lusi eruption: Lessons learned from multidisciplinary studies (LUSI LAB) », *Marine and Petroleum Geology*, n°90 (2018), p. 1-9

¹⁷ C'est le terme que propose E.L. QUARANTELLI in PERRY, R.W., QUARANTELLI, E.L. (eds.), *What is a disaster ? New answers to Old questions*, Xlibris, Philadelphie (2005), 444 p.

¹⁸ DAUPHINE, A., PROVITOLO, D., *Risques et catastrophes - Observer, spatialiser, comprendre, gérer*, Armand Colin 2è ed., Paris (2013), p. 19-20

¹⁹ GILBERT, C., « La vulnérabilité, une notion vulnérable ? » in BECERRA, S., PELTIER, A. (dirs.), *Risques et environnement : recherches interdisciplinaires sur la vulnérabilité des sociétés*, L'Harmattan, Paris (2009), p. 28-29

Dans quelle mesure l'éruption du LUSI relève-t-elle d'un cas particulier de volcanisme discuté par les scientifiques, induisant une catastrophe aux enjeux spécifiques à gérer territorialement ?

En d'autres termes, l'étude tentera de replacer le cas du *Lumpur Sidoarjo* dans le contexte global des types de structures volcaniques, et d'étudier ses implications en tant que catastrophe en cours de réalisation²⁰ à laquelle les différents acteurs tentent d'apporter des réponses dans une dynamique de résilience du territoire, à plusieurs niveaux d'échelle.

Tout d'abord, un état des lieux de la connaissance sur les mécanismes définissant les structures des *mud volcanoes*, sous la lumière du volcanisme magmatique, proposera une comparaison des deux grands types de fonctionnement volcaniques terrestres, en mettant en avant leurs ressemblances et différences, à la fois externes et internes, fondamentales. Le cas particulier du volcan de boue LUSI sera ensuite discuté en tant que système hybride.

Puis, l'éruption de cette structure volcanique sera observée sous le prisme de la catastrophe induite dans le district du Sidoarjo, sur l'île de Java, et dont les enjeux s'inscrivent dans le caractère apparemment inédit de celle-ci. L'ampleur spatio-temporelle du désastre implique en effet de nombreux acteurs parmi lesquels figurent les autorités décisionnaires, la population, ou encore les scientifiques dont les conclusions peuvent orienter la gestion mouvante de ce risque. La problématique de la vulnérabilité et de la résilience du territoire soumis à cet événement catastrophique long sera soulevée, aboutissant à l'examen de l'imbrication systémique de ces deux notions dans les réponses proposées face à la perturbation subie, à différents niveaux scalaires.

²⁰ « A l'inverse des risques qui se situent dans le monde du probable, les crises, les désastres, ou les catastrophes sont bien réels. Une catastrophe ou un désastre est un risque qui se réalise. » in DAUPHINE, A., PROVITOLLO, D., *op. cit.*, p. 19

PREMIÈRE PARTIE

QUELLE PLACE ATTRIBUER AU LUSI DANS LA CLASSIFICATION DES STRUCTURES VOLCANIQUES TERRESTRES ? MISE EN PARALLÈLE DES SYSTÈMES VOLCANIQUES MAGMATIQUES ET SÉDIMENTAIRES

Les assez rares travaux qui proposent une synthèse sur l'état de la connaissance des *mud volcanoes* au niveau mondial évoquent, au mieux, succinctement, les ressemblances de ces systèmes géologiques avec les volcans magmatiques. Ainsi, pour L.I. DIMITROV, les caractéristiques communes entre ces deux types de volcans sont limitées et résident essentiellement dans leurs structures morphologiques visibles à la surface, mais aussi dans la forme éruptive de leur activité²¹. G. ETIOPE et A. MAZZINI, qui tentent de clarifier les mécanismes des volcans de boue et leurs manifestations dans leur article de référence rédigé en 2017, ne font pour seule mention directe au volcanisme magmatique que la forme de certains *mud volcanoes*, notamment conique²².

Pourtant, la terminologie employée reprend celle propre aux volcans classiques, se fondant sur l'observation de la topographie, de la morphologie, et des manifestations des *mud volcanoes* en surface. Les analogies sont donc aisées et permettent de relier les deux formes de volcanisme terrestre. Au-delà des apparences, des similarités existent aussi dans l'intimité des systèmes, mais elles ne doivent pas faire obstacle à la distinction des mécanismes internes. C'est donc en plongeant dans les profondeurs de l'alimentation de ces structures que la comparaison se délite davantage.

L'objet de cette partie est de proposer une mise en perspective des dynamiques du volcanisme sédimentaire au regard du volcanisme magmatique, sans prétendre à l'exhaustivité des points de comparaison. Nous nous demanderons ensuite quelle place le LUSI tient-il dans la classification de ces structures volcaniques. En effet, sous l'apparente forme du volcan de boue qu'il revêt, nous exposerons les discussions scientifiques qui remettent en question le mécanisme profond de la structure du LUSI. Ce volcan terrestre étant au cœur de l'étude, l'observation proposée sera ici focalisée sur les manifestations subaériennes (*onshore*) de ces volcanismes, marginalisant de fait l'analyse des structures sous-marines (*offshore*).

²¹ « Despite their name, the only characteristics of mud volcanoes that link them with normal (magmatic) volcanism are the surface morphology and the vague resemblance in the activity » in DIMITROV, L.I., *op. cit.*, p. 51.

²² MAZZINI, A., ETIOPE, G., *op. cit.*, p. 81-112

CHAPITRE I - UNE APPARENTE SIMILARITÉ DE FORMES À LA SURFACE

I. Une morphologie des *mud volcanoes* visuellement semblable à celle des volcans magmatiques, mais dans des proportions moindres

La forme d'un volcan peut se définir par son altitude, par son emprise spatiale (superficie, diamètre), par la déclivité de ses pentes, l'ensemble lui donnant un aspect visuel qui lui est propre.

D'emblée, les *mud volcanoes* paraissent bien moins impressionnants que les volcans magmatiques. En effet, si le plus haut volcan de boue documenté et culminant à un peu plus de 600 m. est sous-marin, au Sud de la mer Caspienne²³, le plus élevé sur terre est le Touragai en Azerbaïdjan (400 mètres environ) et il est rare que ceux-ci dépassent les 200 m. d'altitude, ne faisant souvent même que quelques mètres de hauteur²⁴. Le plus haut volcan magmatique subaérien (actif mais en phase de repos), à la frontière entre les Andes chiliennes et argentines (le Nevado Ojos Del Salado), s'élève quant à lui à 6893 mètres au dessus de la surface terrestre (**figures 1a et 1b**). Il convient néanmoins de préciser ici que l'environnement topographique dans lequel se place la structure volcanique influe sur la perception plus ou moins massive de l'édifice observé²⁵.

De même, tandis qu'un *mud volcano* individuel s'étend sur une base dépassant rarement les 4 km de diamètre, — mais étant capable de s'étaler sur une surface de plus de 100 km² lorsque les épanchements boueux de plusieurs édifices proches finissent par former un seul ensemble, comme dans le Nord de la Papouasie Occidentale, en Nouvelle-Guinée²⁶ — les volcans magmatiques ont parfois un diamètre de 100 km à l'image de la partie émergée du Mauna Loa dans l'archipel d'Hawaï²⁷ — pour des emprises dépassant 1000 km² à l'instar de l'Etna en Sicile, quand les *trapps* balsatiques peuvent quant à eux avoir recouvert jusqu'à 2 000 000 de km² dans le Karoo en

²³ YUSIFOV, M., RABINOWITZ, P., « Classification of mud volcanoes in the South Caspian Basin, offshore Azerbaijan », *Marine and Petroleum Geology*, n°21 (2004), p. 968

²⁴ MAZZINI, A., ETIOPE, G., *op. cit.*, p. 85 et DIMITROV, L.I., *op. cit.*, p. 52

²⁵ Par ailleurs, l'altitude d'un volcan dépend du substratum sur lequel il repose, et il est judicieux d'évoquer davantage la dénivellation (ou hauteur) pour nuancer ce paramètre, ce que souligne le volcanologue J.-M. Bardintzeff, précisant les exemples de la Soufrière de l'île de Saint-Vincent et du Popocatepetl en Amérique centrale ayant tout deux une dénivellation de 3000 m., le premier, posé sur le plateau sous-marin, s'élevant à seulement 1000 m d'altitude au-dessus de la mer, le second à 5000 m. au-dessus des hauts plateaux mexicains, in BARDINTZEFF, J.-M., *Volcans*, Armand Colin (1993), Paris, p. 40-41

²⁶ DIMITROV, L.I., *op. cit.*, p. 52-53

²⁷ TAZIEFF, H., DERRUAU, M., *op. cit.*, p. 47



Figure 1a : Le Touragai, volcan sédimentaire dressé sur la plaine de la Koura en Azerbaïdjan, culminant à 400 m. pour une circonférence d'environ 4,5 km (vue dans le sens ouest/est)
© F. Odonne, 2014



Figure 1b : Le Nevado Ojos del Salado s'élevant à près de 6900 m. d'altitude, faisant de lui le volcan magmatique actif le plus élevé, et le 2ème point culminant de la Cordillère des Andes
© ameriquedusud.org, 2018

Afrique du Sud²⁸.

Les dynamiques qui façonnent ces deux types de volcans aboutissent néanmoins à des formes comparables. La morphologie classique du *mud volcano* est conique, ressemblant en cela à celle des strato-volcans²⁹ : les accumulations de matières boueuses contribuent à la construction de l'édifice volcanique dans le premier cas, la superposition des différentes coulées (de laves ou de téphra) ayant abouti à la formation d'importants massifs³⁰ dans le second — dans des proportions cependant bien plus conséquentes que pour les volcans de boue. En effet, à titre d'analogie, la quantité totale de lave émise par une seule éruption (le Laki en Islande, entre 1783 et 1784) correspond au volume total connu de boue éjecté par le *mud volcano* le plus prolifique³¹ au cours de son existence entière : 12 km³.

Par ailleurs, pour ces deux types de structures, l'érosion est un paramètre à prendre en compte dans le modelage morphologique dans le temps : eau météorique (pluies, neige), vent, variations de température. Il en est de même pour la nature des écoulements : le degré de viscosité de lave des volcans magmatiques va, par exemple, déterminer la forme en bouclier des volcans effusifs hawaïens ou encore l'aspect en pain de sucre des protrusions en aiguille très visqueuses des volcans péléens³². D'une façon similaire, le type d'émissions des *mud volcanoes* va conditionner leur forme : ainsi, une haute teneur en eau des éruptions de ceux-ci produit des morphologies plus étalées et des pentes plus douces, tandis que des éruptions davantage gazeuses peuvent conduire à l'explosion du cratère principal à la manière d'une caldeira et à la destruction partielle de l'édifice³³. Comme les volcans magmatiques, les *mud volcanoes* possèdent donc des cratères formés par l'émission des matériaux, avec l'émergence de différents cônes éruptifs, ainsi que des orifices secondaires tels que les événements.

Le **tableau I** rassemble, de façon analogique et illustrée, quelques éléments morphologiques de surface formés par les éruptions, caractéristiques de ces deux types de structures volcaniques.

²⁸ LEFEVRE, C., *Volcans et risques volcaniques*, Ellipses, Paris (2010), p. 29

²⁹ MAZZINI, A., ETIOPE, G., *op. cit.*, p. 85-88

³⁰ « les strato-volcans, constitués d'une alternance de laves et de niveaux de cendres, forment les plus importants massifs » in BARDINTZEFF, J.-M., *op. cit.*, p. 40

³¹ BARDINTZEFF, J.-M., *op. cit.*, p. 48 et MAZZINI, A., ETIOPE, G., *Ibid.*

³² TAZIEFF, H., DERRUAU, M., *op. cit.*, p. 66

³³ MAZZINI, A., ETIOPE, G., *Ibid.*

Tableau I : Exemple de lexique morphologique comparatif illustré des principales structures d'émissions des volcans magmatiques et sédimentaires

Conception : Mathieu Huyez (d'après F. Michel; C. Lefèvre; H. Tazieff; L.I. Dimitrov; A. Mazzini, E. Etiope)

Lecture du tableau :		Terminologie	Définition analogique
Illustration A (volcan magmatique)		Illustration B (volcan sédimentaire)	
Cratère Le cratère est la zone d'affleurement d'un conduit central, qu'il soit magmatique (cheminée) ou sédimentaire (canal d'alimentation), situé la plupart du temps au sommet de la structure volcanique. Souvent circulaires, ses formes sont toutefois variées, modelées par les dynamiques éruptives et les facteurs météoriques d'érosion. Quand un cratère s'effondre, par vidange du réservoir sous-jacent (de lave ou de boue), ou suite à une violente explosion, il forme une caldeira .			
 Cratère Dolomieu, Piton de la Fournaise (La Réunion) © M. Huyez, 2009		 Cratère du Gharniarigh (Iran) © A. Mazzini, 2017	
Spatter cone Petits cônes volcaniques pouvant se traduire par « cônes constitués d'éclaboussures ». Pour les volcans magmatiques, ce sont de petits reliefs formés sur un point d'émission par des laves et scories liquides qui se ressoudent, tandis que pour les mud volcanoes, ils sont appelés griffons , formés par des éclaboussures de boue épaisse, et se regroupent dans les cratères, ou ailleurs sur l'édifice.			
 Spatter cone sur le Kilauea (Hawaï) © volcanochaser, 2005		 Champ de griffons au sein du cratère du Dashgil (Azerbaïdjan) © A. Mazzini, 2017	
Lac (d'eau) de cratère De nombreux types de lacs existent en milieu volcanique. Ceux de cratère sont des maars ou des lacs de caldeira pour les volcans magmatiques et l'eau provient d'une nappe phréatique ou des précipitations. Pour les mud volcanoes, les salsa lakes , de proportions plus modestes mais pouvant atteindre plusieurs dizaines de mètres de diamètre, correspondent à des suintements d'eau (et de gaz) suffisants pour compenser l'évaporation, et parfois complétés par les apports d'eau météorique.			
 Lac de Viti, caldeira de l'Askja (Islande) © H. Thorburn, 2010		 Salsa lake de l'Ain (Azerbaïdjan) © A. Mazzini, 2017	

2. Quelles sont les ressemblances dans l'activité et les manifestations des deux types de volcans ?

Les formes des volcans sont donc en partie la conséquence de ce qu'ils éjectent. B. GEZE classe les volcans magmatiques suivant les trois grandes catégories de matériaux qu'ils expulsent : liquide, solide, gazeux³⁴. Ces pôles déterminent ainsi 4 types de volcans : hawaïen dominé par les coulées de laves, dôméen caractérisé par l'émission de dômes visqueux³⁵, strombolien situé à la croisée des deux types précédents, et enfin vulcanien davantage explosif provoquant des nuées chargées de cendres. Les *mud volcanoes* émettent également ces trois pôles de matière : l'aspect liquide correspond aux boues plus ou moins visqueuses ayant afflué à la surface³⁶, le pôle solide se réfère aux fragments de roches expulsés provenant des différentes strates lithographiques traversées par la remontée des fluides sous pression à travers le canal d'alimentation³⁷ et densifiant la boue, enfin, le pôle gazeux, généralement dominé par les émissions de méthane (CH₄)³⁸, donc sans odeur particulière contrairement au soufre, par exemple, rejeté par les volcans magmatiques, d'après Francis ODONNE ³⁹.

Notons tout d'abord que c'est le pôle gazeux qui prédomine dans les éjections des volcans de boue. D'autre part, les aspects liquide et solide des matériaux expulsés par ceux-ci sont presque toujours associés et forment des épanchements semi-liquides appelés, rarement *diapiric melange* par certains auteurs comme A.J. BARBER⁴⁰, mais bien plus souvent *mud breccia* (**figure 3**). Cette dernière expression, apparue en 1989 dans l'article coordonné par M.B. CITA faisant état de la découverte de diapirs de boue dans la crête méditerranéenne⁴¹, est encore aujourd'hui préférée

³⁴ TAZIEFF, H., DERRUAU, M., *op. cit.*, p. 71-73

³⁵ Cette classe est cependant qualifiée par J.-M. BARDINTZEFF de « péléen », se référant ainsi davantage à la première typologie proposée pour les volcans magmatiques, par Alfred Lacroix au début du XX^e s., in BARDINTZEFF, J.-M., *op. cit.*, p. 38

³⁶ DIMITROV, L.I., *op. cit.*, p. 50

³⁷ *Ibid.*, p. 51

³⁸ BALOGLANOV, E. E., et al. « Anomalies in gas-hydrogeochemical indicators of mud volcanoes in connection with seismic activity : On the basis of mud volcanoes data in Shamakhi-Gobustan (Azerbaijan) and Sakhalin Island (Russia) », *ISJ Theoretical & Applied Science*, 01, vol. 57 (2018), p. 177

³⁹ « Les vrais *mud volcanoes* sédimentaires rejettent du méthane et ça ne sent pas », « plus de 98% des gaz qui s'échappent c'est du méthane » d'après l'entretien recueilli auprès de F. ODONNE le 18 mai 2021 (cf. extraits en **Annexe I**)

⁴⁰ in DIMITROV, L.I., *Ibid.*

⁴¹ CITA, M.B., et al., « Discovery of mud diapirism on the Mediterranean ridge : a preliminary report », *Boll. Soc. Geol. Ital.*, vol. 108 (1989), p. 537-543



Figure 2 : Carte de localisation des principaux toponymes employés en référence à l'Azerbaïdjan (les mud volcanoes sont signifiés par des triangles blancs)

Conception : Mathieu Huyez (photo satellite support © GoogleEarth 2021)

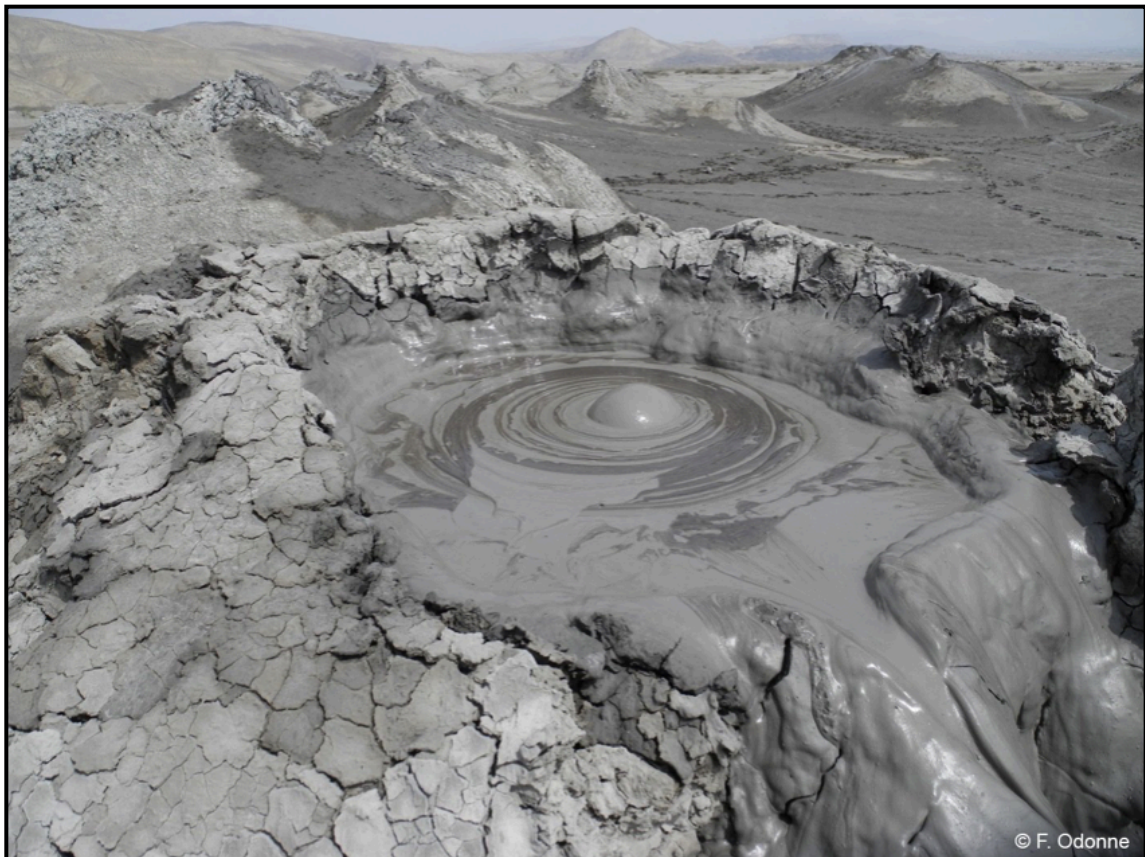


Figure 3 : Expulsion de mud breccia relativement fluide, avec bulle de méthane, sur le Dashgil, en Azerbaïdjan © F.Odonne, 2017

Noter les tâches sombres correspondant à de l'huile organique (hydrocarbures). La matière éruptée s'empile et se solidifie en formant ici des griffons haut de 2 à 3 mètres.

— pour laquelle F. ODONNE propose la traduction de *brèche de boue*⁴² i.e. des boues faites de roches fragmentées. Les roches détritiques qui composent les *mud breccia* éjectées mesurent de quelques millimètres à plus de 10 mètres. Elles peuvent s'apparenter aux fragments de laves solidifiés et roches magmatiques (lapillis, bombes volcaniques,...) du pôle solide des volcans « classiques ».

L'évaluation de l'activité volcanique se fait suivant les mêmes critères pour les deux types de structures, révélant une nouvelle fois l'empreinte des volcans magmatiques sur l'observation et l'analyse des *mud volcanoes*. Ainsi, les niveaux définis permettent de distinguer les volcans magmatiques « actifs », qui sont soit en éruption, soit « en sommeil » ou « dormant », des volcans dits « éteints »⁴³, cependant que la terminologie employée pour signifier l'activité des volcans de boue utilise les qualificatifs « éruptif », « dormant », « éteint », auxquels l'équipe chapeautée par A. MAZZINI ajoute « fossile »⁴⁴.

Qu'exprime chacune de ces classes ? Les mots proposés pour les deux types de structures renvoient à des descriptions globalement similaires, révélant des points communs dans leurs fonctionnements respectifs. Par exemple, la période de dormance entre deux éruptions correspond au temps nécessaire à la fois à la recharge du système, qu'il soit magmatique ou sédimentaire, et au percement du bouchon obstruant plus ou moins le canal principal d'alimentation de la structure. Cela permet d'observer une ressemblance certaine dans la fréquence d'activité des deux catégories de volcans : plusieurs années ou décennies séparent deux périodes éruptives (les éruptions elles-mêmes sont cependant plus courtes en général pour les *mud volcanoes*, dépassant rarement quelques jours)⁴⁵.

Mais ces termes comportent des nuances concernant notamment le degré d'activité induit pour une même catégorie : en phase « éteinte », un *mud volcano* peut présenter des signes d'activité faible tels que des émissions de gaz, contrairement à un volcan magmatique de cette même classe. Une autre différence se manifeste dans la temporalité se rapportant à chaque catégorie. En effet, les volcans magmatiques « actifs » renvoient à la notion d'observation « d'au moins une éruption historique »⁴⁶. Or, si les temps historiques peuvent remonter à l'Antiquité

⁴² « La *mud breccia* c'est ce qui ressort, de la boue avec des fragments, du substratum profond, quelques fois des roches mères. En Azerbaïdjan, c'est une formation qui provient du Miocène, avec des grès qui viennent de la roche mère ». Elle contient « des silts, de l'argile, (...) de l'eau et du gaz. Et parfois du pétrole. [Les] reflets un peu sombre [correspondent à] des hydrocarbures ». Entretien réalisé le 18 mai 2021. Voir extraits en **Annexe I**.

⁴³ LEFEVRE, C., *op. cit.*, Chapitre 3 « Comment évaluer l'activité volcanique ? », p. 37-42

⁴⁴ MAZZINI, A., ETIOPE, G., *op. cit.*, p. 83

⁴⁵ KOPF, A.J., « Significance of mud volcanism », *Reviews of Geophysics*, n°40, 2 (2002), p. 1-52

⁴⁶ TAZIEFF, H., DERRUAU, M., *op. cit.*, p. 17

Tableau 2 : Comparaison de la terminologie, des temporalités et des significations de l'activité observable des volcans magmatiques et sédimentaires

Conception : Mathieu Huyez (d'après les données de A. Mazzini, E. Etiope; C. Lefèvre; H. Tazieff, M. Derruau)

Terminologie du niveau d'activité volcanique estimé	Temporalité	Signification commune	Signification différenciée
Actif éruptif	Durée de l'éruption du volcan	Le volcan est en éruption, tant que sa dynamique d'alimentation lui fournit des matériaux à éjecter.	La durée éruptive est souvent très courte pour les <i>mud volcano</i> s, n'excédant que rarement quelques jours.
Actif dormant	Période inactive entre deux éruptions	La pression dans les canaux d'alimentation augmente peu à peu, pouvant générer différents signes de réveil (émissions de vapeur, de gaz, gonflements). La période de repos est similaire quelle que soit la nature du volcan. Elle dépend du temps nécessaire à la recharge du système (réservoirs magmatiques ou sédimentaires) et de celui qu'il faut aux fluides pour percer le bouchon obstruant le canal d'alimentation principal.	Dans le cas des volcans de boue, les suintements d'eau et de gaz sont fréquents durant les phases de sommeil.
Eteint	Pas d'activité « récente » documentée	Pas d'éruption documentée dans les temps historiques, ce qui pose donc la question de l'inégalité de traitement des volcans, quelle que soit leur catégorie : si les volcans sédimentaires sont globalement moins surveillés et connus, certains volcans magmatiques ne sont répertoriés que depuis des périodes historiquement récentes (ceux d'Hokkaido depuis le XVII ^e s. tandis que ceux de la Méditerranée sont observés dès l'Antiquité). Des volcans peuvent donc avoir eu des éruptions « oubliées » ou inconnues.	Le recul temporel est moins important pour les <i>mud volcano</i> s, dont l'étude est globalement récente. Les signes d'activité peuvent être présents à des niveaux très bas pour ces volcans de boue pourtant considéré comme éteint (pas d'éruption connue), se traduisant par des émanations faibles de gaz.
Fossile	Anciennes structures, paléo-volcans	Les structures sont souvent peu visibles dans le paysage, parfois enterrées. Le terme de « paléo-volcans » s'applique aux deux types de volcanisme.	—

gréco-romaine (qui marque le début des récits éruptifs) pour ce type de volcanisme, cela ramène plus souvent l'échelle temporelle à des époques bien plus récentes concernant les *mud volcanoes*, car il faut qu'il y ait eu des observateurs conscients du phénomène du volcanisme sédimentaire. De même, le caractère « éteint » d'un volcan dépend du degré de documentation scientifique sur ses éruptions dans un passé plus ou moins éloigné.

Une comparaison des critères retenus pour définir le degré d'activité des deux types de structures est présentée en **tableau 2** (*supra*).

3. Tentative de typologie comparée des volcanismes magmatique et sédimentaire : manifestations éruptives et morphologies associées

Afin de confronter ces deux grands types de volcanisme, nous proposons une typologie alliant les catégories d'émission aux formes des édifices créés par les éruptions. Rappelons ici que notre étude se focalise sur les structures subaériennes.

La mise en parallèle des types de volcans magmatiques et de boue en fonction des 3 pôles communs caractérisant l'activité de leurs émissions — liquide, solide, gazeux — aboutit au schéma typologique de synthèse de la **figure 4** illustré en **tableau 3**, ci-après. La classification retenue pour les volcans magmatiques est celle de Bernard GEZE⁴⁷ et modifiée par J.-M. BARDINTZEFF⁴⁸, déjà évoquée *supra*, tandis que celle utilisée pour les volcans sédimentaires s'appuie sur les travaux de M. KALINKO repris par L.I. DIMITROV⁴⁹ et que nous choisissons de croiser avec les descriptions morphologiques réalisées par A. MAZZINI et G. ETIOPE⁵⁰ (**Annexe 2**) et par Francis ODONNE⁵¹. Cela nous conduit à la création d'une quatrième classe pour les *mud volcanoes*, absente de la typologie de référence, et cohérente avec la mise en comparaison avec les volcans magmatiques. Cet ajout entraîne une inversion à la base du schéma de B. GEZE des pôles « solide » et « liquide » afin de faire suivre les numéros de classe du volcanisme sédimentaire. Chaque catégorie comporte un sous-titre correspondant à un volcan de référence. Celui retenu pour la nouvelle classe alors créée s'appuie sur les observations effectuées par F. ODONNE. Notons que les *mud volcanoes* pris comme repères se situent tous en Azerbaïdjan (cf. **figure 2**), lieu privilégié d'étude par les scientifiques, par le nombre et la diversité de phénomènes recensés.

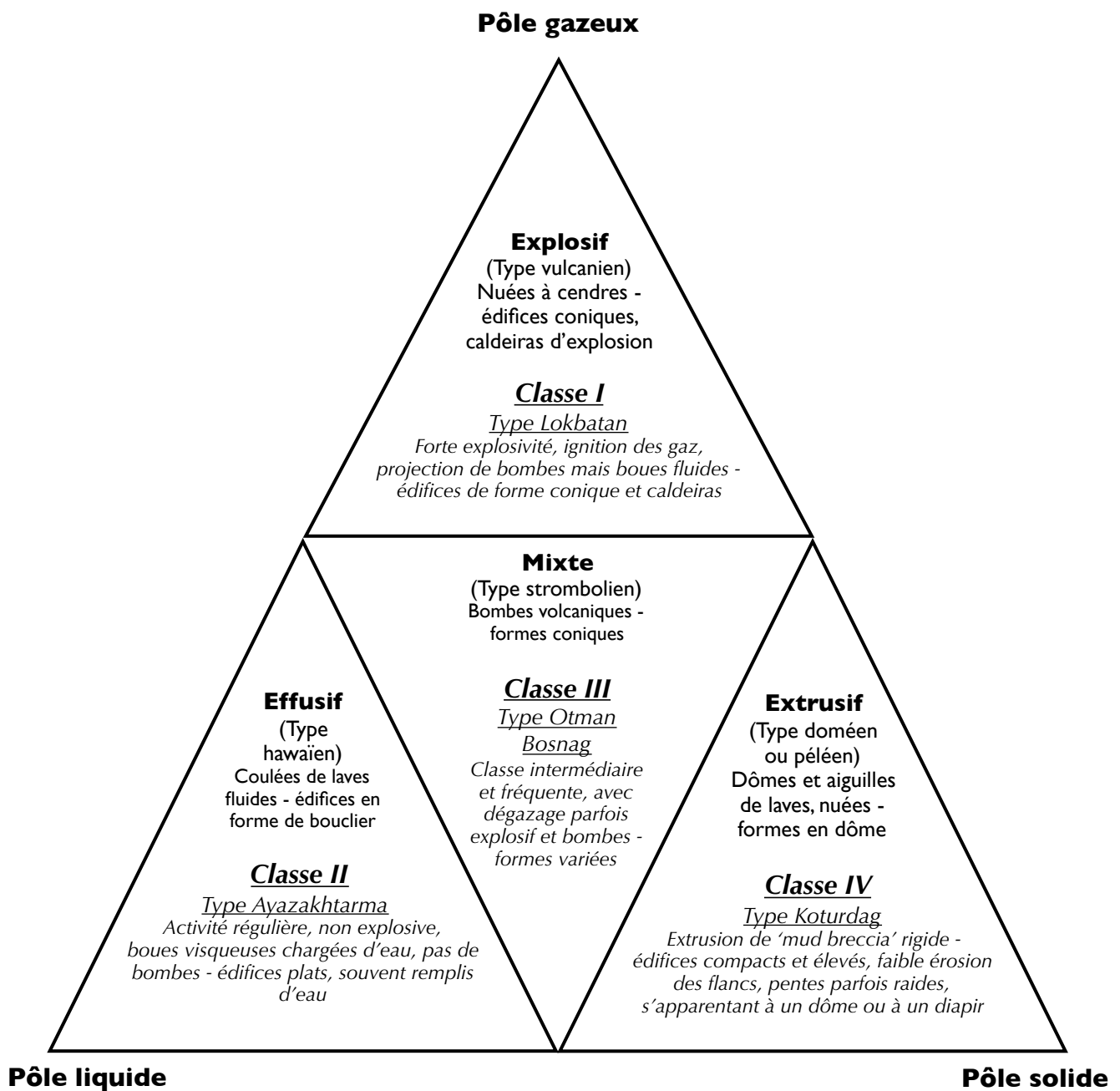
⁴⁷ *Ibid.*, p. 72

⁴⁸ BARDINTZEFF, J.-M., *op. cit.*, p. 38

⁴⁹ DIMITROV, L.I., *op. cit.*, p. 54

⁵⁰ MAZZINI, A., ETIOPE, G., *op. cit.*, p. 85-92

⁵¹ Entretien du 18 mai 2021.



Légende

Volcanisme magmatique :

Catégorie
(volcan-type)

Caractéristiques dominantes (activité - morphologie)

Volcanisme sédimentaire :

Catégorie
volcan-type

Caractéristiques dominantes (activité - morphologie)

Figure 4 : Classification synthétique comparative des types éruptifs des volcans magmatiques et sédimentaires en fonction des 3 pôles communs caractérisant leurs émissions

Conception : Mathieu Huyez

(D'après les données de B. Gèze; J.-M. Bardintzeff; M. Kalinko; L.I. Dimitrov; A. Mazzini, G. Etiope, F. Odonne)

— **La classe I** dans la distribution des *mud volcanoes* s'apparente à la catégorie des volcans magmatiques explosifs par la violence des éruptions. Dans les deux types de structures volcaniques, le gaz s'échappe brutalement, rompant un bouchon (de *mud breccia* ou bien de lave visqueuse solidifiée) présent dans le canal d'alimentation. Toutefois, le potentiel explosif des volcans de type vulcanien est bien plus fort que celui des structures de type Lokbatan. Les éruptions de ces premiers sont plus espacées que celles des deuxièmes. Les nuées de cendres, constituant la manifestation caractéristique de cette catégorie pour le volcanisme magmatique, sont absentes dans le cas du volcanisme sédimentaire. Les morphologies des édifices alors constitués dans cette classe sont similaires pour les deux types de volcans, et s'apparentent le plus souvent à des cônes qui peuvent être pulvérisés pour laisser place à des caldeiras lors des éruptions les plus intenses. L'ignition des gaz (notamment du méthane) peut produire des flammes observées jusqu'à 600 m. de haut⁵². Notons que contrairement aux volcans magmatiques, les *mud volcanoes* de cette classe ont leur pôle liquide (la boue) beaucoup moins visqueux. Force est donc de constater que le degré d'explosivité est inversement proportionnelle à la viscosité des boues dans le volcanisme sédimentaire, contrairement au volcanisme magmatique.

— **La classe II** des volcans de boue s'avère beaucoup moins explosive (comme pour les volcans magmatiques de cette catégorie), même si les émanations de gaz sont importantes : ils sont expulsés en quantité plus uniforme, de même que les boues, chargées d'eau, sans projection de bombes⁵³. Si cette catégorie est la plus proche du pôle liquide, les boues sont toutefois visqueuses, contrairement aux laves effusives du type hawaïen des volcans magmatiques. Les structures morphologiques produites présentent quelques similitudes dans les deux cas. De faible hauteur voire totalement plane pour les *mud volcanoes* (en plateau, comme ceux étudiés par F. ODONNE en Azerbaïdjan⁵⁴), en forme de bouclier, parfois de forme conique abaissée pour l'autre type. Les premiers peuvent même s'apparenter à une mare ou contenir un lac de boue avec gaz bullant dont les émissions prennent la forme de *mud pies* (traduit par F. ODONNE en « galettes de boue ») dans le cratère, tandis que les seconds peuvent abriter un lac de lave.

⁵² Lors de l'éruption du Lokbatan du 5 janvier 1887 in DIMITROV, L.I., *op. cit.*, p. 70

⁵³ A l'instar de l'Ayazakhtarma sur lequel « on n'a jamais trouvé d'impact de bombe » selon F. ODONNE.

⁵⁴ « Que ce soit sur l'Ayazakhtarma ou sur l'Akhtarma-Pashaly, la sortie de boue ne fait pas de relief parce que ça flotte, (...) sur une espèce de gros coussin, de boue liquide », « l'épaisseur du bol de boue sous-jacent (...) a une profondeur probable de 300 à 400 m, avec mince croûte de boue d'environ 10 à 15 m », plus dense, à la surface. Ces volcans sont des « plateaux » qui « poussent sur leurs bords (...), ils s'étalent ». D'après Francis ODONNE, propos tenus lors de l'entretien du 18 mai 2021.

— **La classe III** est intermédiaire entre les pôles liquide, gazeux et solide. C'est un type transitoire qui a été peu explicité par l'auteur de la classification. Il s'agit de volcans de boue alliant des caractéristiques des deux premières catégories, avec des périodes éruptives pouvant être relativement explosives. Cette catégorie rassemble de fait une part importante de ces structures. Elle réfère à la classe mixte des volcans magmatiques, de type strombolien, se distinguant par des coulées de laves plus visqueuses que le type hawaïen, et un volume de matériaux solides éjectés du même ordre que celui des laves⁵⁵. Mais il n'est pas toujours évident de déterminer les critères d'appartenance à cette classe. Ainsi, dans l'un et l'autre type de volcanisme, cette catégorie rappelle qu'établir une typologie des éruptions est complexifiée par le fait qu'une même structure peut être à l'origine de plusieurs dynamismes éruptifs. Par ailleurs, les formes d'édifices sont, dans les deux cas, globalement coniques.

— **La classe IV** des *mud volcanoes*, inexistante dans la typologie de M. KALINKO, est ici proposée en comparaison de la catégorie extrusive des volcans magmatiques. Elle renvoie à une certaine dominance du pôle solide. Comme les laves des volcans doméens qui se solidifient rapidement, ne s'épanchent pas et s'accumulent aux points d'émission, formant des protusions en dômes ou aiguilles⁵⁶, la boue échappée des *mud volcanoes* de cette catégorie est plus rigide et compacte, pouvant également former des édifices en dôme ou ressemblant à des diapirs. Les flancs de ces volcans de boue sont parfois abruptes, très peu érodés par les facteurs météoriques (pluie, vent), mais leurs coulées de *mud breccia* s'étirent relativement, en formant des langues striées. Les structures peuvent aussi paraître à des tubes érigés de matière épaisse (boue argileuse). Le *mud volcano* que nous choisissons en référence pour cette classe est le Koturdag, en Azerbaïdjan, décrit par Francis ODONNE comme éructant des boues très visqueuses formant des dômes suite à sa campagne de terrain en 2014 et 2015⁵⁷. Ces édifices atteignent des hauteurs significatives (183 m. dans l'exemple-type retenu ici) du fait de l'extrusion de matériaux très compacts.

⁵⁵ TAZIEFF, H., DERRUAU, M., *op. cit.*, p. 48

⁵⁶ LEFEVRE, C., *op. cit.*, p. 69-70

⁵⁷ « Et sur place, tu as cet espèce de dôme, avec la sortie. A la base ça donne la coulée. On avait mis une marque de peinture en 2014. En septembre on l'a trouvé à 5 mètres, ça fait 4 cm par jour. C'est un espèce de diapir de boue, c'est-à-dire que ce qui sort est plus épais, beaucoup plus visqueux ». Entretien du 18 mai 2021.

Tableau 3 : Classification illustrée comparée des types de volcans magmatiques et sédimentaires
 Conception : Mathieu Huyez

Classe I / Type explosif

Caractéristique de l'explosivité, la structure en caldeira est ici présentée dans les deux exemples de volcanisme : à droite, celle du Touragai (*mud volcano* d'Azerbaïdjan) mesurant environ 3 m. de hauteur, et en cartouche en haut à gauche, le rebord de celle du Vésuve (volcan magmatique), haute de plusieurs dizaines de mètres. En bas, à gauche, le Lokbatan en éruption (fréquence la plus élevée connue pour cette classe de volcan sédimentaire, soit tous les 2 à 6 ans) : virulentes ignitions de gaz s'élevant ici à plus de 200 mètres de haut. Les projections de boue apparaissent plus sombres, à la base de l'éruption.



Le Vésuve, Italie © C. Grandpey



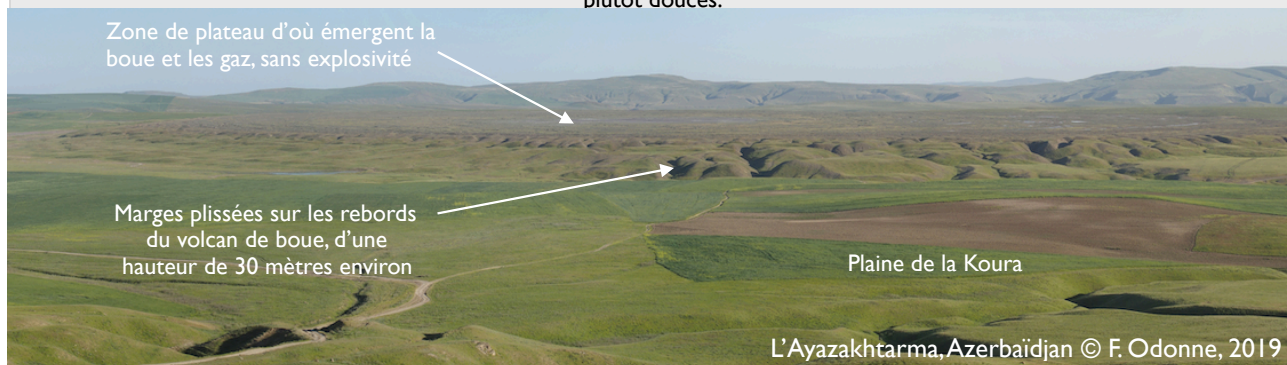
Le Lokbatan, Azerbaïdjan © F. Odonne, 2014



Caldeira du Touragai, Azerbaïdjan © F. Odonne, 2019

Classe II / Type effusif

Le volcan de boue azéri de l'Ayazakhtarma (*en haut*) est représentatif de la classe II : sa forme de plateau (*flat topped*) révèle très peu de relief dans la zone éruptive large de plus de 2 km, seuls ses rebords sont élevés (d'une trentaine de mètres), les plis résultant d'une compression, d'une poussée du volcan qui s'étale sur ses marges, de façon radiale. Pas d'explosion ni de bombes projetées. En-dessous, le « volcan boulier » de La Cumbre, typique du volcanisme magmatique effusif, se caractérise par ses pentes plutôt douces.

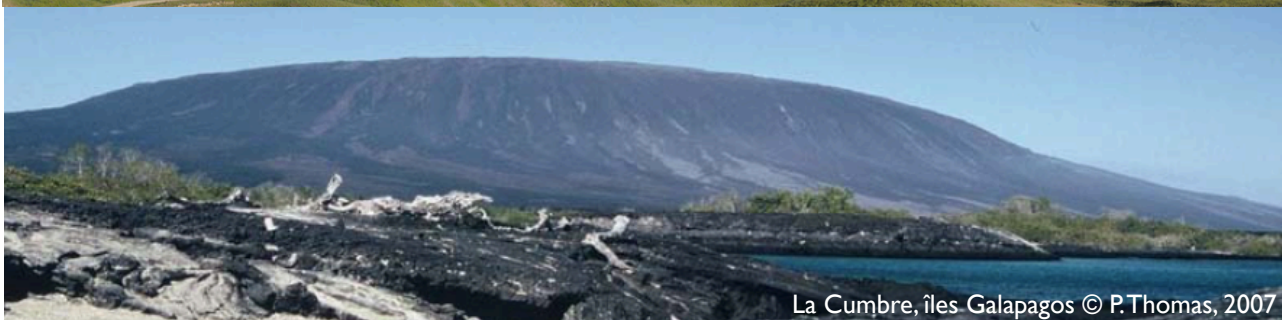


Zone de plateau d'où émergent la boue et les gaz, sans explosivité

Marges plissées sur les rebords du volcan de boue, d'une hauteur de 30 mètres environ

Plaine de la Koura

L'Ayazakhtarma, Azerbaïdjan © F. Odonne, 2019

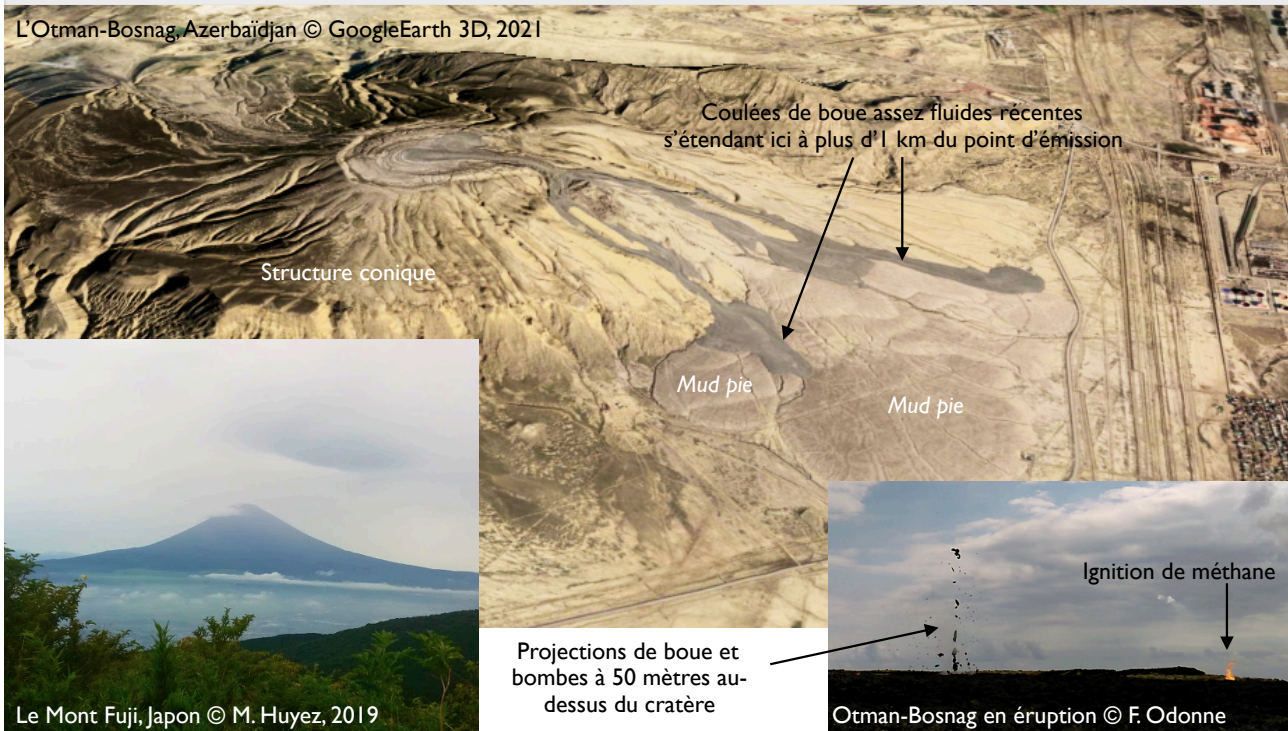


La Cumbre, îles Galapagos © P. Thomas, 2007

Classe III / Type mixte

Le *mud volcano* choisi pour signifier cette classe intermédiaire est l'Otman-Bosnag : sa forme conique (comparable à celle des strato-volcans magmatiques de type mixte, comme le Mont Fuji) est caractéristique, de même que ses épandements boueux assez fluides s'étirant jusqu'à 2 km du cratère, formant en bout de course des empilements en galettes (*mud pies*). Ses éruptions comportent parfois des ignitions de gaz et souvent des projections de bombes.

L'Otman-Bosnag, Azerbaïdjan © GoogleEarth 3D, 2021



Classe IV / Type extrusif

La boue très rigide de cette classe de *mud volcano* aboutit à des formes en dôme, comme pour le Koturdag en Azerbaïdjan. Chez les volcans magmatiques comme le Paluweh, ce type extrusif se traduit par des morphologies en protusion (dômes et aiguilles) résultant de la solidification rapide des laves au niveau du point d'émission.



Les points communs sont nombreux dans la morphologie des volcans sédimentaires confrontée à celle des volcans magmatiques. La forme des structures invite donc l'observateur à la comparaison : édifices façonnés en cône, cratères circulaires, bouches éruptives, événements, suintements. Leurs apparences et constructions morphologiques évoluent dans le temps (empilements de laves ou de *mud breccia*, effondrement de cratères, facteurs météoriques d'érosion,...). Elles sont corrélées, pour les deux types de volcans, à leurs manifestations éruptives suivant 3 pôles communs (liquide, solide, gazeux). Même si l'étude des *mud volcanoes* est plus récente, on peut remarquer que les fréquences d'activité à l'origine de ces émissions sont relativement similaires, en distinguant, tant pour les volcans magmatiques que de boue, des périodes actives d'éruption, des phases de dormance, et des structures éteintes voire fossiles. L'intensité des éruptions des *mud volcanoes* (en terme de volumes émis et d'explosivité) se révèle toutefois bien moindre que celle des volcans « classiques ».

La typologie proposée a tenté de mettre en parallèle ces deux types de volcanisme terrestre, illustrant la complexité, dans l'un et l'autre cas, à définir des limites nettes entre les différentes catégories, mais présentant leurs manifestations éruptives globalement comparables, aboutissant à des morphologies similaires. Les formes semblent toutefois plus diversifiées pour les volcans sédimentaires, avec par exemple les singuliers plateaux caractéristiques de la classe II. La différence la plus remarquable réside sans doute dans le degré inverse de la viscosité des fluides émis, entre les volcans magmatiques et ceux sédimentaires, au sein de la catégorie explosive/classe I.

Le chapitre suivant s'attachera à montrer si cette apparente similarité des morphologies et des dynamiques éruptives, peut également s'appliquer au mode de fonctionnement des deux types de systèmes volcaniques, de leur alimentation profonde à leur subsurface.

CHAPITRE II - DANS QUELLE MESURE LES ALIMENTATIONS PROFONDES SONT-ELLES DIFFÉRENCIÉES ?

I. Confrontation de la distribution spatiale des deux types de volcanisme : des contextes géologiques de formation divergents ?

Les cartes présentées *infra* permettent d'examiner la répartition des volcans magmatiques (**figure 5**) et sédimentaires sur la planète, au regard des différents contextes géologiques qui les sous-tendent. Seul L.I. DIMITROV a proposé une représentation cartographique de la distribution des *mud volcanoes* associée à des éléments de géologie interne (**figure 6**).

Le premier point de comparaison est la présence des deux types de volcans dans les zones de subduction des plaques lithosphériques, et notamment au niveau des marges continentales actives, là où une plaque océanique et une plaque continentale convergent : la première, plus dense, s'enfonçant et plongeant sous la deuxième. Ce sont des zones propices à la fois à la remontée de magma (Ceinture de feu du Pacifique notamment), et à la formation de prismes d'accrétion (i.e. de bourrelets de sédiments repoussés vers la surface au lieu d'être « avalés » avec la plaque océanique subsidente⁵⁸), et de bassins sédimentaires d'arrière-arc (par exemple dans le complexe d'accrétion de la zone de collision entre les plaques indo-australienne et eurasiennne en Indonésie⁵⁹) créant des volcans sédimentaires sous-marins et subaériens. Globalement, toutes les zones de compression tectonique sont favorables à la formation de *mud volcanoes* : les limites actives de plaque, mais aussi des ceintures de plissement (exemple : les Barbades avec 5 km d'épaisseur de sédiments, complété par les apports du fleuve Orénoque), des structures orogéniques (comme le Caucase)⁶⁰. Ces dynamismes entraînent un fort taux de sédimentation et donc une faible compaction des sédiments⁶¹ qui restent gorgés d'éléments non dissous (eau de mer, matière organique) qui peuvent constituer des fluides sous pression⁶².

⁵⁸ BOILLOT, G., *La dynamique de la lithosphère*, Masson, Paris (1996), p. 12 et p. 76-77

⁵⁹ DIMITROV, L.I., *op. cit.*, p. 56-57

⁶⁰ *Ibid.*, p. 59

⁶¹ « Les volcans de boue, c'est toujours dans les zones de sédimentation rapide » selon F. ODONNE (entretien du 18 mai 2021).

⁶² DEQUINCEY, O., « Lusi, volcan de boue de Sidoarjo (Indonésie) : naissance, controverses et impacts », *Planet-Terre*, ENS Lyon (2012)

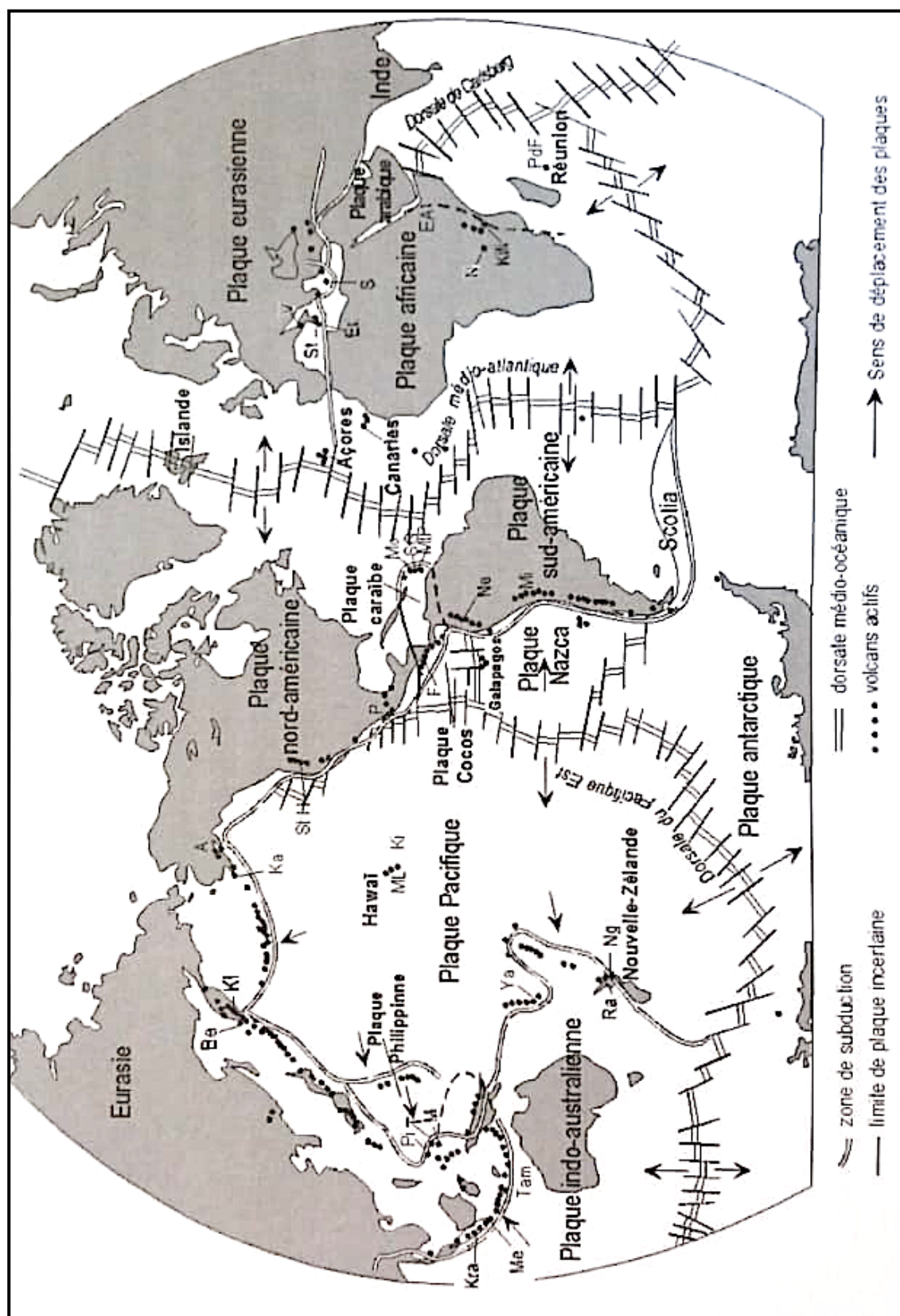


Figure 5 : Carte de la tectonique des plaques et de la répartition des principaux volcans magmatiques actifs

Source : C. Lefèvre, *Volcans et risques volcaniques*, 2010, p. 20

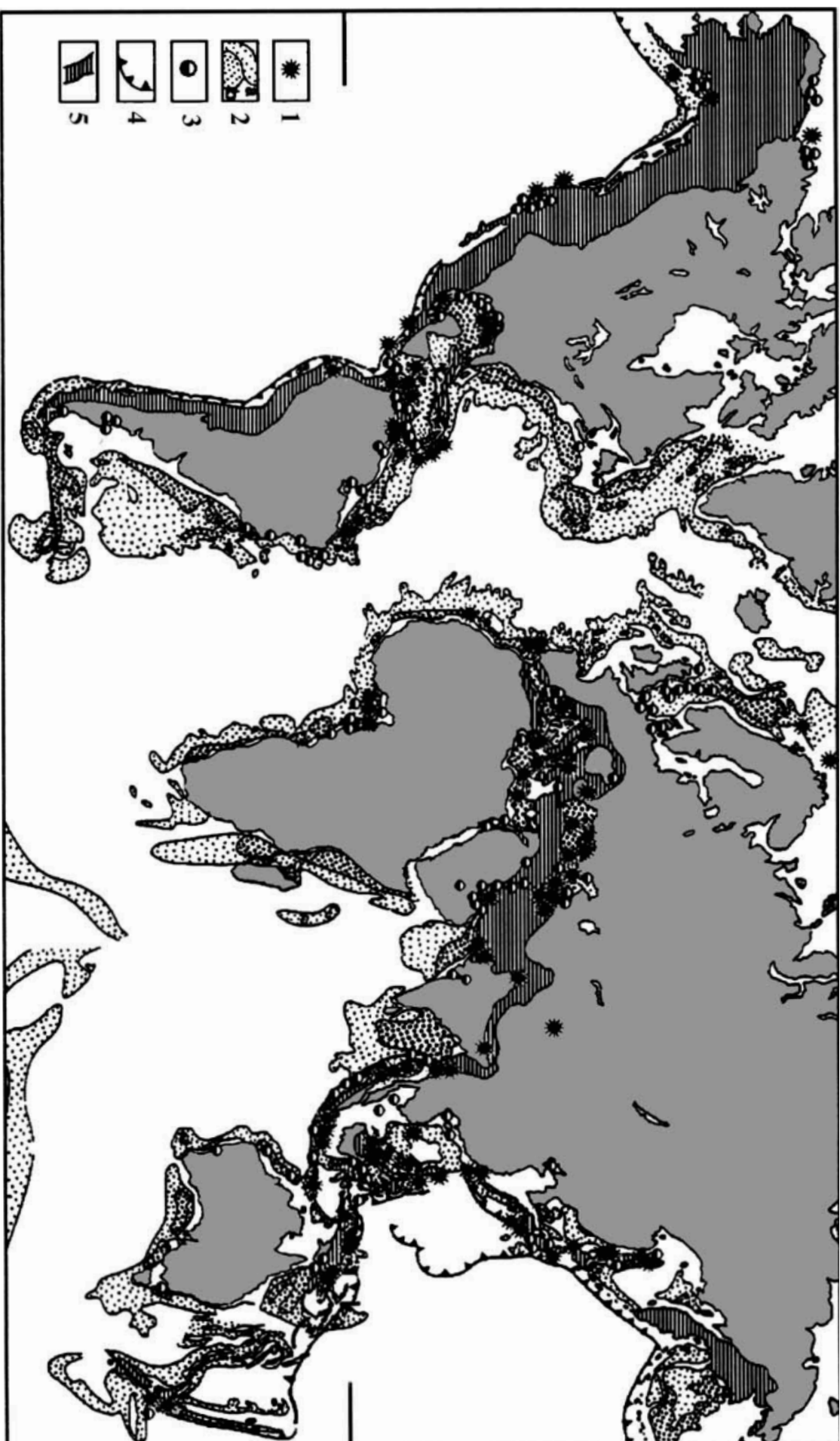


Figure 6 : Planisphère de la spatialisation des volcans sédimentaires

Source : L.I. Dimitrov, *Earth-Science Reviews*, 2002

Légende : **1** : Localisation des *mud volcanoes* répertoriés, individuels ou groupés ; **2** : Epaisseur des sédiments dans les zones à l'écart des plateaux continentaux - **(a)** : de 1 à 4 km **(b)** : plus de 4 km ; **3** : principales zones de production industrielle d'hydrocarbures ; **4** : zones de subduction ; **5** : zones de compression active

Ces zones sont également sismiques, et il convient de souligner ici le rôle de la tectonique et des systèmes de faille tant dans le déclenchement des remontées magmatiques, que de la fragmentation des couches litosphériques permettant la remontée des fluides profonds qui peut donc favoriser le volcanisme sédimentaire. La vitesse relative de déplacement des plaques conditionne la productivité de magma à leurs frontières : plus la vitesse de subduction est élevée, plus la quantité de magma sera importante⁶³. Les séismes peuvent ouvrir des failles favorisant le passage du magma. Le lien entre activité tectonique et volcans de boue a quant à lui été étudié dans différents contextes, comme en Azerbaïdjan et à Sakhaline⁶⁴, mais aussi dans le cas du LUSI, lequel sera discuté *infra* (Partie 2 Ch. 1), avec là aussi l'ouverture de failles dans la roche, mais également le phénomène de liquéfaction des fluides enclenché par la propagation des ondes sismiques qui augmente, de fait, la pression dans les couches argileuses.

En deuxième lieu, des volcans de chacun de ces types se situent en-dehors de ces zones de collision, mais avec des facteurs explicatifs différents. Pour les volcans magmatiques, le contexte des plaques divergentes fait naître des rides (ou dorsales) pouvant favoriser les remontées de roches en fusion depuis l'asthénosphère⁶⁵. Ce type de volcanisme existe aussi en intra-plaque aux *hot spots* (points chauds) : des panaches de matières en provenance du manteau profond de la Terre se concentrent en un point fixe à la base de la lithosphère et leur fusion entraîne la formation de magma, capable de remonter jusqu'à la surface⁶⁶. C'est le cas, sur le planisphère (**figure 5**), du Piton de La Fournaise ou encore des volcans de l'archipel d'Hawaï. Dans le cas des volcans sédimentaires, des structures se forment aussi à l'écart des frontières de plaques convergentes. Il s'agit de zones de sédimentation dans les marges continentales passives, donc sans subduction, les contextes à sédimentation rapide (comme les *fan deltas*)⁶⁷, des bassins sédimentaires non compensés, i.e. soumis à une compaction accélérée et donc incomplète sous leur propre poids (15 km d'épaisseur en Mer Noire)⁶⁸, mais ce sont là essentiellement des structures en milieux marins

⁶³ BADZINTZEFF, J.-M., *op. cit.*, p. 30

⁶⁴ BALOGLANOV, E. E., *et al.*, *op. cit.*, p. 176-182

⁶⁵ LEFEVRE, C., *op. cit.*, p. 21

⁶⁶ *Ibid.*, p. 26-27

⁶⁷ MAZZINI, A., ETIOPE, G., *op. cit.*, p. 83-84

⁶⁸ DIMITROV, L.I., *op. cit.*, p. 59

(auxquelles il convient d'ajouter celles du fond du lac Baïkal, seule exception limnique connue⁶⁹), hors de notre étude.

Enfin, la relation entre emplacement des volcans et structure géologique qui distingue sans doute le plus les *mud volcanoes* des édifices magmatiques correspond aux zones de genèse d'hydrocarbures. Les faciès lithologiques situés à l'aplomb de volcans sédimentaires sont en effet favorables à abriter des réservoirs naturels pétroliers et gazeux⁷⁰. Les *mud volcanoes* sont donc liés aux bassins pétrolifères et représentent une expression de surface d'écoulements naturels des hydrocarbures (pétrole et gaz)⁷¹. Ils font ainsi partie de la dynamique de formation de produits pétroliers⁷². Cela ne signifie pas pour autant qu'ils soient systématiquement liés à des gisements souterrains, lesquels sont notamment absents des prismes d'accrétion trop récents⁷³. Ce lien avec la présence d'hydrocarbures n'existe pas pour expliquer la localisation des formations de volcans magmatiques.

2. Mise en parallèle des mécanismes de formation des deux systèmes volcaniques, de l'alimentation profonde à la subsurface

Dans les deux types de volcans, l'alimentation éruptive est profonde.

Le magma, basaltique dans les zones de divergence et de points chauds, andésitique au niveau des subductions de plaque, provient cependant de zones plus profondes, du manteau supérieur, probablement à 60 km sous la surface terrestre. Il remonte ensuite à travers l'écorce et est stocké dans des chambres magmatiques à plusieurs kilomètres de profondeur⁷⁴.

⁶⁹ Ce sont là des *mud volcanoes* en contexte de sédimentation rapide liée aux apports du delta de la Selenga couplés au dynamisme d'un système de failles tectoniques sous-jacent, in CUYLAERTS, M., et al., *op. cit.*, p. 385

⁷⁰ *Ibid.*

⁷¹ ABRAMS, M.A., « Significance of hydrocarbon seepage relative to petroleum generation and entrapment », *Marine and Petroleum Geology*, n°22 (2005), p. 457–477

⁷² « Les MV sont liés à des zones de sédimentation très importante, les sédiments sont mal compactés et quand ils se compactent progressivement, ils vont évacuer les fluides, en même temps qu'il y a eu de la maturation organique : on évacue du méthane, de [l'eau], de l'huile, tout ressort. Y a une quantité importante de gaz, c'est le gros moteur (...) Des couches sédimentaires en grand nombre qui sont mal compactées (...) [et] tu as une grande tranche où tu vas avoir maturation des matières organiques et donc fabrication d'hydrocarbures [comme en Azerbaïdjan]. (...) C'est ce qui intéresse les pétroliers. » D'après les propos de Francis ODONNE recueillis le 18 mai 2021.

⁷³ DIMITROV, L.I., *Idib.*

⁷⁴ LEFEVRE, C., *op. cit.*, Ch.2 « Où et comment naissent les magmas ? », p. 31-36

Les sédiments qui vont créer les *mud volcanoes*, quant à eux, se situent dans les couches lithosphériques à quelques km sous la surface, et peuvent être stockés également dans des réservoirs intermédiaires avant d'atteindre la surface. La profondeur de leur origine peut être déterminée par la nature des roches détritiques éruptées, et certains volcans sédimentaires ont alors des racines descendant jusqu'à 15 km sous terre⁷⁵.

Chez les volcans magmatiques, tandis que les éruptions de lave plutôt effusive se font par remontée de magma vers la surface, celles davantage explosives correspondent à une rupture d'équilibre brutale. Ce sont les mécanismes sous-jacents à l'œuvre dans ce deuxième type d'éruptions qui s'apparentent le plus à ceux des volcans sédimentaires. En effet, un paramètre dont il faut tenir compte pour ces systèmes est la pression des fluides qui va enclencher le dynamisme éruptif.

En grande profondeur, le magma en lui-même a tendance à remonter car il est moins dense que les roches (périodites) qui l'entourent. D'autre part, les fluides que constituent notamment l'eau et les gaz, soumis à de très hautes températures et pressions, sont solubles dans le magma. Mais lors de leurs remontées, avec la baisse de la pression et de la température, ces fluides s'échappent et peuvent faire pression en « éclatant » au sein du magma, ce qui est un facteur déclenchant une éruption explosive⁷⁶. L'eau dont il est question entre au contact du magma par infiltration en profondeur depuis la surface, ou par hydratation lithosphérique depuis la plaque océanique plongeante⁷⁷.

Attardons-nous sur le cas du volcanisme sédimentaire. Plusieurs formes de pression internes se combinent (**figure 7**, ci-contre) pour aboutir à l'expression de surface du *mud volcano*. Si l'activité sismique et la force tectonique peuvent accélérer le processus en fragilisant l'équilibre des pressions des fluides, ou en créant des fractures qui vont faciliter la migration des boues, il convient de distinguer les deux mécanismes principaux suivants :

— le principe de flottabilité, ou poussée d'Archimède, induite par la présence d'une couche de schistes argileux plastiques, moins denses, chargés en gaz. Piégée par un taux de sédimentation rapide qui n'a pas pu la compacter suffisamment, et se trouvant recouverte par une couche plus

⁷⁵ C'est notamment le cas en Mer Caspienne, in MAZZINI, A., ETIOPE, G., *op. cit.*, p. 102

⁷⁶ Notons toutefois que d'autres paramètres sont à prendre en compte dans le déclenchement du dynamisme éruptif des volcans explosifs : la différenciation des magmas « basique » et « acide » dans la chambre magmatique, le brassage de ces magmas qui modifie les conditions thermodynamiques de la chambre, et la pression exercée par le toit volcanique, par sa résistance. BARDINTZEFF, J.-M., *op. cit.*, p. 27-31

⁷⁷ « Il y a autant d'eau dans toute la lithosphère que dans les océans du globe » d'après F. ODONNE. Entretien du 18 mai 2021.

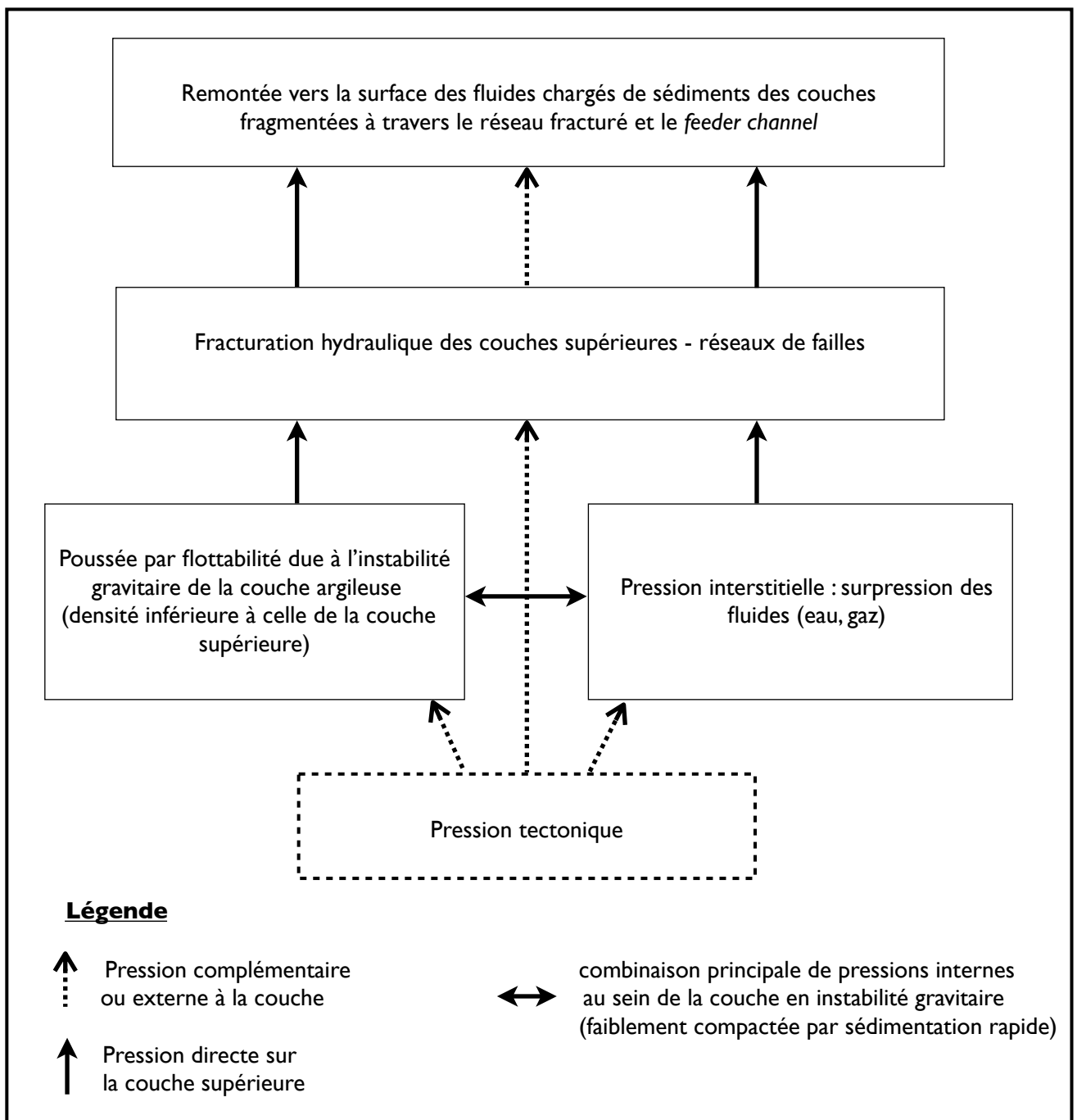


Figure 7 : Schéma synthétique des mécanismes de pression à l'origine de la formation des volcans sédimentaires

Conception : Mathieu Huyez

(d'après L.I. Dimitrov; A.J. Kopf; A. Mazzini et G. Etiope; F. Odonne)

dense, la couche argileuse est en instabilité gravitaire⁷⁸. Cette poussée, le cas échéant, se fait vers la partie anticlinale de la couche.

— A cette force s'ajoute la pression interstitielle. Dans ce contexte de compaction limitée des sédiments évoqué *supra*, l'eau contenue dans les interstices subit une forte pression liée au poids de surcharge, ce qui met en surpression les matériaux de la couche argileuse par rapport à ceux

⁷⁸ MAZZINI, A., ETIOPE, G., *op. cit.*, p. 101

environnants. Cela d'autant plus que les matières organiques contenues dans les sédiments peu compactés créent des gaz qui viennent ajouter à cette pression⁷⁹.

—> Lorsque ces pressions interstitielles excèdent les forces internes, ou la pression lithosphérique, des fractures verticales apparaissent, favorisant la remontée des fluides vers la surface, lesquels se chargent de sédiments récupérés à travers les couches qu'ils vont fragmenter : c'est ainsi que se forme la *mud breccia* que vont érupter les volcans sédimentaires. Sinon, les fluides restent bloqués en profondeur par fermeture des fissures faute de pression suffisante, ou simplement en raison de leur rencontre avec une couche imperméable⁸⁰.

Arrivés en subsurface, les fluides vont s'organiser en réseaux alternant fractures et parfois réservoirs secondaires, avant d'atteindre la surface, dans l'un et l'autre type de volcans.

Ainsi, le magma, en provenance de la chambre magmatique principale ou des réservoirs magmatiques intermédiaires, va être injecté dans les filons induits par la fracturation, avec plusieurs formes suivant leur orientation⁸¹: les *sills* horizontaux, les *dykes* obliques, et enfin les *necks* verticaux qui constituent souvent le conduit de remontée central appelé cheminée volcanique et au bout duquel se trouve le cratère principal.

La structure de subsurface des volcans sédimentaires fait remonter la *mud breccia* par un canal d'alimentation (nommé *feeder channel* dans la littérature scientifique sur le sujet) qui apparaît selon certaines hypothèses comme fracturé⁸². Cette boue et ces gaz empruntent alors ces réseaux de fracturation avant d'atteindre la surface où ils vont s'exprimer sous forme de griffons, événements et autres *salsa lakes* et former un cratère au sommet de la fracture principale. Les analyses sismiques de la structure des volcans sédimentaires ont révélé la présence des réservoirs de boue à une profondeur de 50 à 100 m. sous les bouches éruptives. D'autres réservoirs moins profonds permettraient de recharger et relâcher les fluides en surpression après chaque éruption, selon d'autres recherches. L'analyse profonde est complexifiée par les signaux brouillés en raison de l'eau et des gaz contenus dans le sous-sol.

⁷⁹ DIMITROV, L.I., *op. cit.*, p. 59-61

⁸⁰ DEQUINCEY, O., *op. cit.*

⁸¹ LEFEVRE, C., *op. cit.*, p. 45-46

⁸² MAZZINI, A., ETIOPE, G., *op. cit.*, p. 92

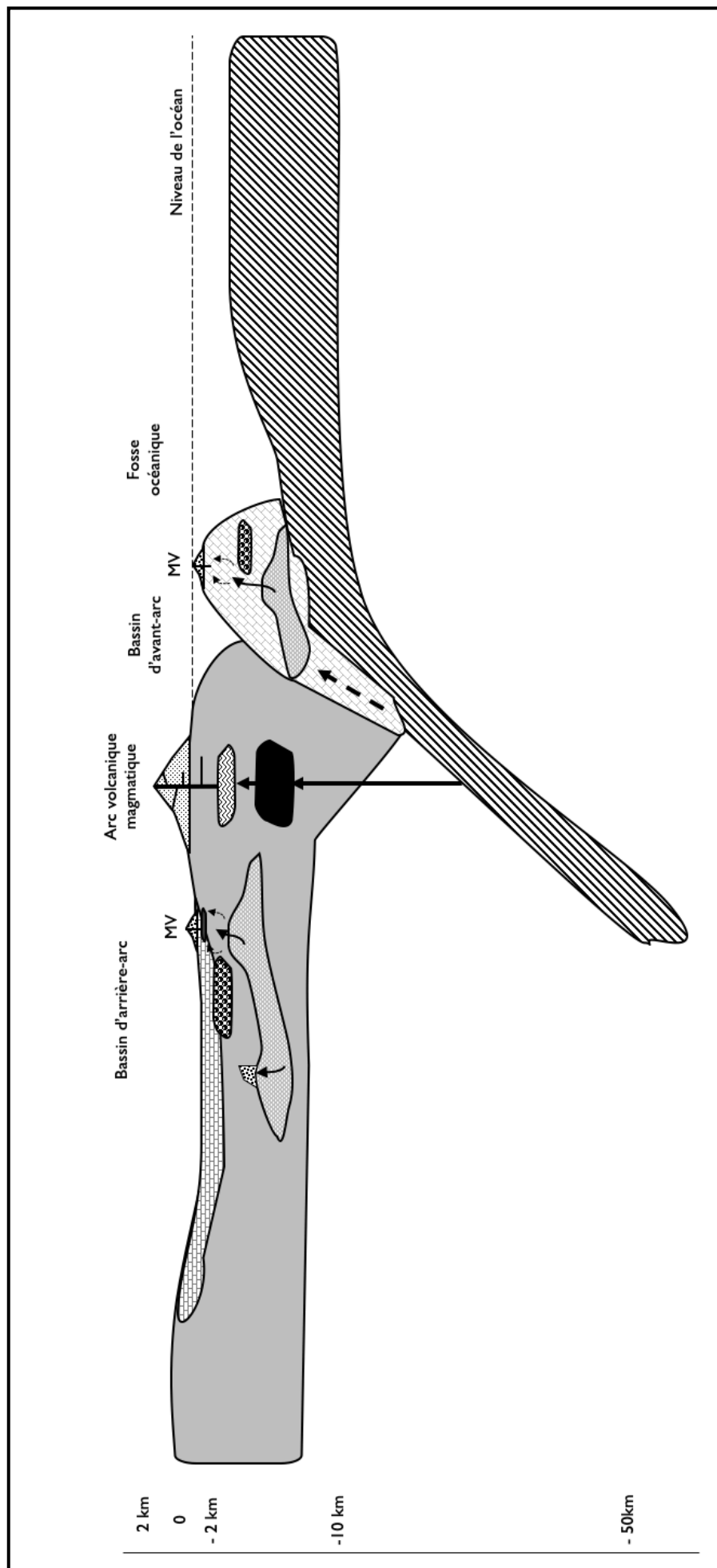
3. Synthèse : un exemple comparé schématisé de la structure interne des deux types de volcanisme

Nous proposons ici un schéma (**figure 8**) permettant de résumer les mécanismes internes qui prévalent dans les dynamiques d'édification des volcans. Il est fait le choix de retenir en trame de fond géologique un contexte de subduction de plaque océanique sous une plaque continentale (marge continentale active). En effet, nous avons vu *supra* que c'est une situation privilégiée à la fois de volcanisme magmatique (andésitique, davantage explosif) et de volcanisme sédimentaire au-dessus des prismes d'accrétion ou des bassins d'arrière-arc.

Une situation d'arc volcanique formé par la fusion de roches induite par la subduction des plaques est ainsi présentée, avec la schématisation ici d'un seul édifice magmatique, en coupe. Un *mud volcano* constitué au-dessus d'un prisme d'accrétion est également visible, celui-ci pouvant être immergé, ou émergé (cas des Barbades par exemple). Une couche sédimentaire en instabilité gravitaire, sous le bassin d'arrière-arc, montre deux exemples d'initiation de remontées de fluides vers la surface, au niveau de deux axes anticlinaux. Le premier (à la gauche du bassin), n'aboutit pas à une migration dans les couches supérieures, et se traduit par un diapir⁸³ qui se retrouve bloqué par une strate moins perméable. Le second (à la droite du bassin) révèle l'émergence d'un *mud volcano* probablement grâce à un réseau de fractures (qui peut être dû à la proximité avec l'arc volcanique) ou à une rupture d'équilibre de pression des fluides.

Les mêmes structures, des profondeurs à la subsurface, sont toutefois transposables à d'autres contextes : rifts et points chauds dans les cas des volcans magmatiques, ceintures de plissement, marges orogéniques, zones de sédimentation rapide de deltas et de certaines marges passives pour les volcans sédimentaires.

⁸³ C'est le terme communément admis, d'après A.-J. Kopf, par la communauté scientifique travaillant sur ce sujet, pour désigner les migrations de masses sédimentaires pressurisées ne transperçant pas les strates supérieures in KOPF, A.J., *op. cit.*, p. 4



Légende

Contexte géologique de subduction retenu

Croûte terrestre (plaque continentale)
 Croûte terrestre (plaque océanique subsidente)
 Sédimentation en arrière-arc
 Prisme d'accrétion

Dynamique de formation de l'accrétion sédimentaire par subduction
 Nappes d'hydrocarbures
 MV : Mud volcano

Mécanismes et structures des formations volcaniques

Remontée des fluides par pression	Volcanisme magmatique	Volcanisme sédimentaire
Réservoirs - principaux - intermédiaires	Chambre magmatique Chambre supérieure — Sill — Dyke	Initial ↑ cheminement depuis l'axe anticlinal par les fractures Couche en instabilité gravitaire Réservoir de subsurface Feeder channel
Conduits d'alimentation	Cheminée ou neck	
Édifices volcaniques	Cône volcanique	Mud volcano subaérien ou sous-marin Diapir n'ayant pas abouti à la formation d'un MV

Figure 8 : Vue en coupe simplifiée comparée de la dynamique de formation et de la structure interne des volcans sédimentaires et magmatiques en contexte de subduction (avec prisme d'accrétion et bassin d'arrière-arc)

Conception : Mathieu Huyez

(d'après J.-M. Bardintzeff; G. Boillot; A. J. Kopf; C. Lefèvre; A. Mazzini; F. Michel)

Si le matériel érupté par les deux grandes catégories de volcans terrestres diffèrent globalement, force est de reconnaître que les contextes géologiques dans lesquels prennent place ces structures présentent des similarités, essentiellement aux frontières de plaques tectoniques subsidentes. La plus grande différence de localisation réside dans le lien privilégié qu'entretient le volcanisme sédimentaire avec les formations pétrolifères.

Les mécanismes internes révèlent un point de comparaison intéressant : la pression des fluides dans les réservoirs respectifs (chambre magmatique et couches sédimentaires argileuses en instabilité gravitaire) est un moteur commun aux volcans magmatiques explosifs et aux *mud volcanoes* dans l'initiation du phénomène éruptif. Cette pression peut d'ailleurs être, dans les deux cas, exacerbée, voire initiée, par le facteur sismique.

L'observation des structures, des profondeurs à la subsurface, dénote des ressemblances dans les formes de remontée des fluides. Les conduits et réseaux de fractures qu'empruntent magma et *mud breccia* s'organisent en canaux principaux d'alimentation (cheminée volcanique et *feeder channel*) et zones de fracturation qui vont leur permettre d'atteindre la surface. Des réservoirs secondaires sont possibles dans les deux cas de volcanisme, mais à des profondeurs plus faibles pour les volcans de boue.

La comparaison établie jusqu'ici entre ces deux grands types de volcanisme terrestre n'a toutefois pas encore soulevé la question des interactions possibles entre eux. Le chapitre suivant traitera spécifiquement du cas du LUSI sur l'île de Java, volcan de boue amenant les scientifiques à s'interroger sur ses dynamismes particuliers, lesquels appartiendraient à un type à part de structure volcanique, à la croisée des volcans sédimentaires et magmatiques : la famille des SHGS (*Sediment-Hosted Geothermal Systems*).

CHAPITRE III - LE CAS DU LUSI : UN SYSTÈME VOLCANIQUE HYBRIDE ?

I. Les critères d'appartenance du *Lumpur Sidoarjo* au volcanisme sédimentaire classique

Tout d'abord, l'apparence morphologique de LUSI est typique de l'expression subaérienne de certains volcans sédimentaires (**figures 9 et 10, infra**). Après plus de 10 ans d'éruption, la structure de l'édifice est plane. La zone principale d'émissions (ou cratère) est circulaire, formant un bassin hydrothermal, et les matériaux constituant la *mud breccia* éruptée (de la boue très fluide car contenant de l'eau en grande quantité) se sont répandus de façon radiale autour de celui-ci, de façon extérieurement similaire à de nombreux *mud volcanoes* de classe II décrits en Azerbaïdjan⁸⁴ (mais dont les boues sont plus visqueuses). Le LUSI a donc une forme que F. ODONNE qualifie de « plateau » ou « *flat-topped* »⁸⁵. En s'asséchant, les matériaux forment un empilement en « *mud pies* » selon la description de A. MAZZINI et G. ETIOPE, s'organisant en cercles concentriques⁸⁶. La boue et l'eau émises à haute température constituent le bassin hydrothermal central fumant, et s'écoulent radialement vers la périphérie par des torrents, incisant les marges boueuses asséchées et compactées du LUSI⁸⁷. L'aspect géométrique des contours les plus extérieurs de cette structure volcano-sédimentaire, visible sur la photo satellite, relève de l'endiguement réalisé afin de protéger les villages alentours, lequel limite aussi l'expansion spatiale « naturelle » du volcan.

Apparu dans le bassin d'arrière-arc indonésien, sur l'île de Java, le LUSI se localise dans une zone géologique complexe : le système volcanique magmatique explosif de l'Arjuno-Welirang en contexte de subduction tectonique est situé à environ 25 kilomètres au Sud-Ouest du *mud volcano* (cf. **fig. 10**), prolongé vers le nord-est par le système de faille de Watukosek⁸⁸ (**fig. 9**). C'est également une zone d'exploitation d'hydrocarbures et 3 volcans de boue endormis se situent à moins de 20 km du LUSI, mais sans éruptions documentées (Pulungan, Kalang et Gunung Anyar).

⁸⁴ ODONNE, F. et al., « Mud volcano growth by radial expansion: Examples from onshore Azerbaijan », *Marine and Petroleum Geology* February, vol. 112 (2020), p. 1-2

⁸⁵ « Le LUSI c'est de la boue très fluide avec énormément de gaz », il « ressemble à un plateau, une plaine, sans relief véritable » un peu « à l'image » des volcans de boue « *flat-topped* » comme « l'Ayazakhtarma ou l'Akhtarma-Pashaly » en Azerbaïdjan. D'après l'entretien réalisé le 18 mai 2021 (cf. **Annexe I**).

⁸⁶ MAZZINI, A., ETIOPE, G., *op. cit.*, p. 89-90. La zone de formation du LUSI est subsidente sur une surface de 22 km², indiquant la création d'une caldeira, comme observée sur d'autres *mud volcanoes*.

⁸⁷ NERMOEN, A., et al., « Strike-slip faulting as a trigger mechanism for overpressure release through piercing structures. Implications for the Lusi », *Marine and Petroleum Geology*, n°26 (2009), p.1753

⁸⁸ DEQUINCEY, O., *op. cit.*



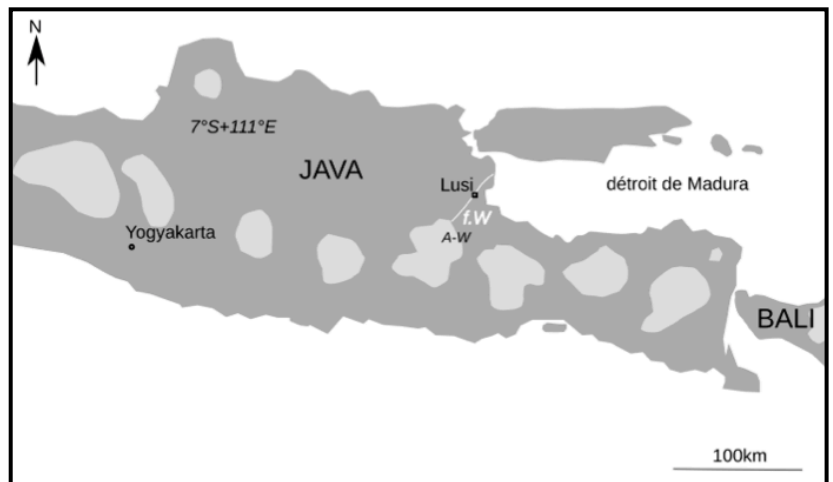
Figure 9 :

En haut : Photo satellite prise au-dessus du LUSI, district de Sidoarjo, Java oriental

© Google Earth, 2021

Ci-contre : Localisation du Lusi sur l'île de Java - A-W : complexe volcanique de l'Arjuno-Welirang; f.W : système de faille de Watukosek

© O. Dequincey, 2012



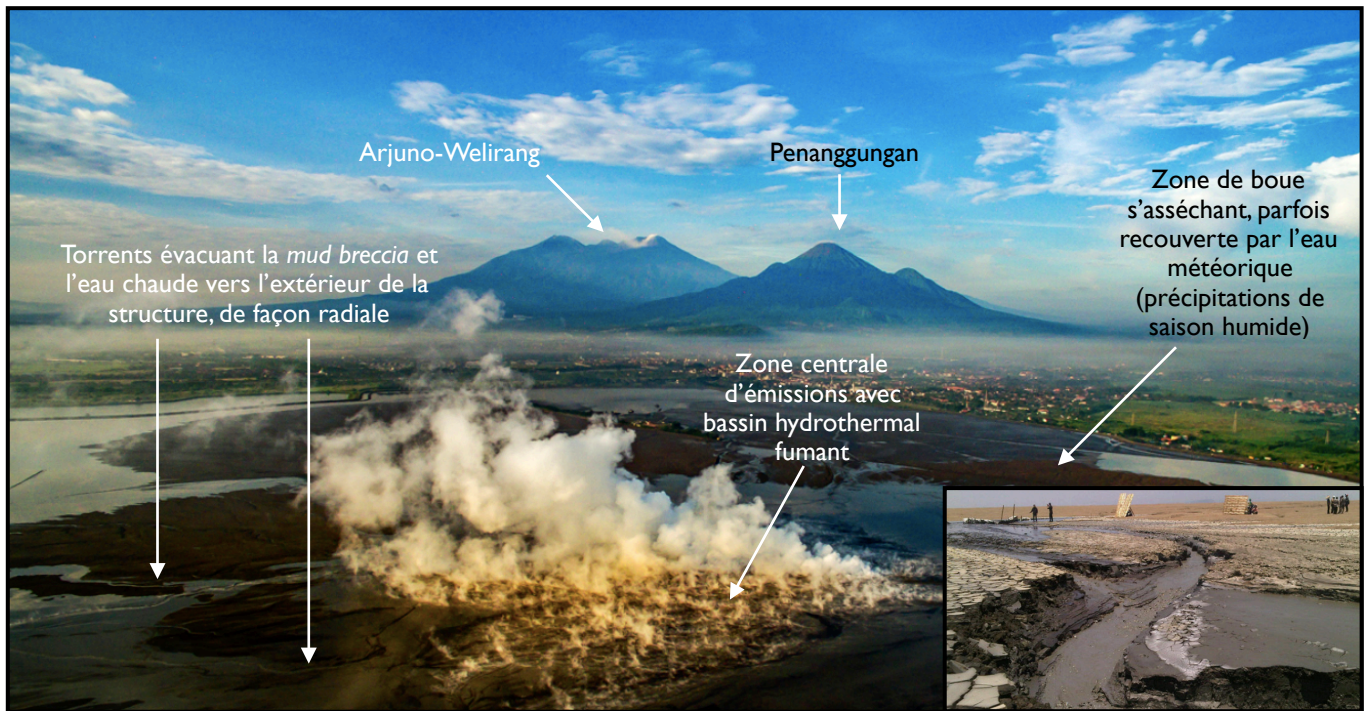


Figure 10 : Vue aérienne de la zone centrale du LUSI, en saison humide, avec complexe volcanique magmatique actif de l'Arjuno-Welirang en arrière-plan (vue nord-est/sud-ouest)

© Oystein Lund Andersen, février 2017

En cartouche : zoom sur des rigoles creusées par les torrents boueux © Andrian Wiyono, 2014

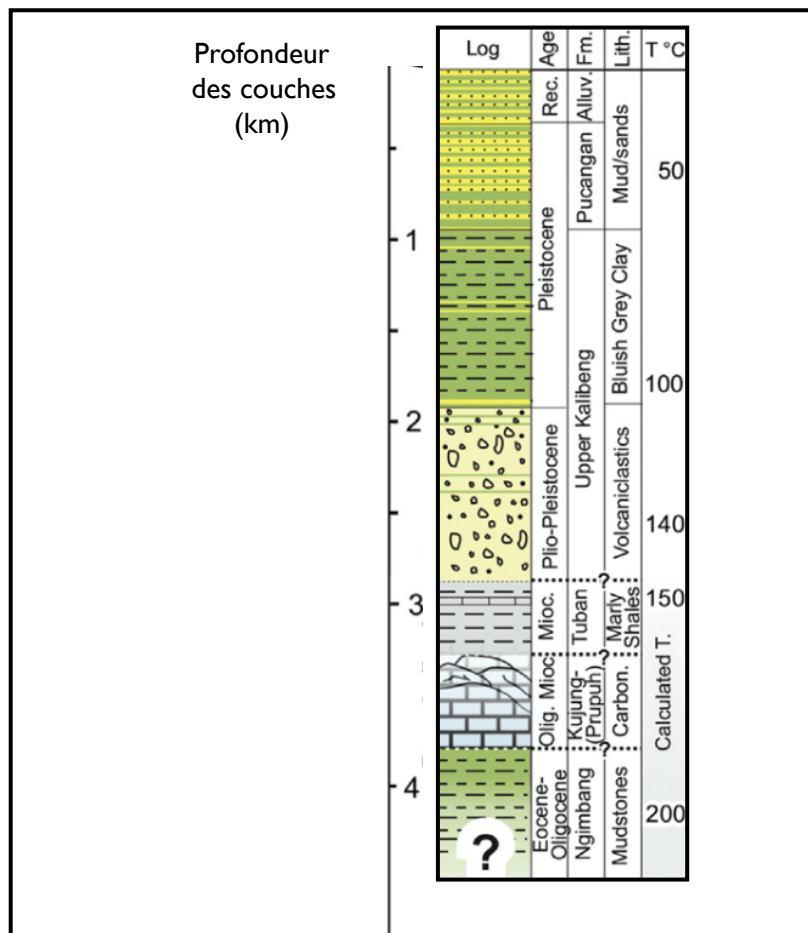


Figure 11 : Stratigraphie à l'aplomb du Lusi

Source : H.H. Svensen et al., *Marine and Petroleum Geology*, n°90, 2018

La sédimentation de la zone où est né LUSI est forte, commencée au moins à partir de l'Eocène, et poursuivie au Miocène puis au Pléistocène (**figure 11**). Certaines couches argileuses sont parfois épaisses de plus d'un kilomètre. Les fluides sous pression proviendraient d'au moins 1,5 km sous le district de Sidoarjo, et donc de la strate *Bluish Grey Clay* (argile grise bleutée), mais sans doute également de profondeurs plus importantes, jusqu'à 5 km⁸⁹.

Il convient à présent de faire un point sur les critères de définition des *mud volcanoes* que la littérature scientifique a établis, afin de constater dans quelle mesure le LUSI y correspond. Les auteurs s'accordent sur ces trois conditions :

- L'éruption de gaz, d'eau, et de sédiments, accompagnée occasionnellement de pétrole. Les gaz sont essentiellement du méthane (CH₄) issu de la décomposition organique dans les couches sédimentaires, mais aussi parfois du dioxyde de carbone (CO₂) dans les contextes de frontière de plaques en subduction notamment. Ces gaz sont dans tous les cas liés au processus de maturation des composants organiques dans la formation naturelle des hydrocarbures⁹⁰.
- L'initiation, dans une couche peu compactée en situation d'instabilité gravitaire, d'une pression formant parfois un diapir, mobilisant dans tous les cas des sédiments, point de départ à la remontée des fluides vers la surface. Le *mud volcano* devient la manifestation de surface de ces fluides pressurisés ayant percé les différentes strates⁹¹.
- La présence de *mud breccia* dans les matières éjectées, étonnamment similaire quel que soit le volcan de boue d'après A.J. KOPF. Elle contient des débris et fragments argileux d'une grande variété, recouvrant tout le spectre des dépôts détritiques. Les formes de ces fragments sont circulaires à légèrement allongées⁹². A noter que la boue est plus homogène en fin d'éruption, lorsque les plus imposants débris ont tous été éjectés.

Or, des éléments liés à l'étude de l'éruption du LUSI questionnent certaines équipes de recherche. Ainsi, l'analyse géochimique des gaz contenus dans les émissions du système volcanique décèle, outre la large prépondérance de vapeur d'eau, une dominance de CO₂ au lieu du CH₄. D'après F. ODONNE, cette composition est davantage caractéristique des volcans magmatiques⁹³.

⁸⁹ SVENSEN, H.H., et. al., « Modelling of gas generation following emplacement of an igneous sill below Lusi, East Java, Indonesia », *Marine and Petroleum Geology*, n°90 (2018), p. 201

⁹⁰ MAZZINI, A., ETIOPE, G., *op. cit.*, p. 83

⁹¹ KOPF, A.J., *op. cit.*, p. 4-5 et DIMITROV, L.I., *op. cit.*, p. 50

⁹² DIMITROV, L.I., *op. cit.*, p. 51

⁹³ « L'origine volcanique [magmatique] elle arrive très vite si tu trouves autre chose que du méthane », les volcans « qui ont un moteur [magmatique], tu vas avoir du CO₂, tu vas avoir du soufre ». Entretien réalisé le 18 mai 2021.

D'autre part, des éléments dérivés du manteau supérieur comme l'hélium (He) y sont présents. La composition des principaux gaz (y compris la vapeur d'eau) laisse donc entendre que leur origine est partiellement thermogénique, c'est-à-dire nécessitant une très haute température (supérieure à 400°C). Cela induit soit une source très profonde dans les couches sédimentaires de production de ces gaz, soit l'apport, plus près de la surface, d'une source de chaleur permettant des températures anormalement élevées⁹⁴. Aussi, le gradient thermique conséquent de 42°C par km, soit environ trois fois plus que celui de 10 à 18°C/km, plus froid, relevés habituellement sous les *mud volcano*⁹⁵, conforte-t-il l'hypothèse d'une source de chaleur ignée. Les boues qui s'échappent d'un volcan sédimentaire classique sont alors à une température de « 17°C maximum »⁹⁶, tandis que l'eau chargée de débris détritiques éjectée par le LUSI a été mesurée au niveau immédiat du cratère d'émission proche de 100°C.

Enfin, l'éruption du LUSI, commencée en 2006, est encore active de nos jours. Ce serait ainsi la plus longue éruption connue d'un *mud volcano*, les périodes d'activités éruptives des volcans sédimentaires ne durant en général que quelques jours au maximum (cf. Partie I Ch. I, *supra*). La *mud breccia* riche en débris clastiques, toujours éruptée, ne plaide d'ailleurs pas en faveur d'une fin d'éruption imminente (la durée de celle-ci sera discutée en Partie 2 ch. I, *infra*). De la matière boueuse et des gaz sont ainsi éjectés à intervalles réguliers, s'apparentant à un geyser⁹⁷.

Ces données sont, pour de nombreux auteurs tels S. INGUAGGIATO, K. KARYONO, A. MAZZINI et H.H. SVENSEN, à mettre en relation avec la proximité du complexe volcanique de l'Arjuno-Welirang qui influencerait sur les dynamismes et le comportement du LUSI.

2. Sur la piste d'un SHGS/SHHS (Sediment-Hosted Geothermal/Hydrothermal System)

Le projet LUSI LAB impulsé par A. MAZZINI a eu pour but de rassembler dans un cadre collégial les recherches multidisciplinaires sur ce phénomène volcanique particulier, gouverné par deux objectifs communs : utiliser l'occasion offerte par cette structure tout juste formée pour une meilleure compréhension des processus qui sous-tendent cette éruption, d'une part, et d'autre part enquêter sur les interactions entre l'activité volcanique et sismique, le réseau de failles, et les

⁹⁴ SVENSEN, H.H., *et al.*, *op. cit.*, p. 201-208

⁹⁵ ODONNE, F., *et al.*, *op. cit.*, p. 2

⁹⁶ D'après les propos recueillis lors de l'entretien avec F. ODONNE. Dans les volcans « à moteur [magmatique], les températures [sont élevées], tu ne vas pas te baigner dedans ».

⁹⁷ SVENSEN, H.H., *et al.*, *Ibid.*

intrusions magmatiques⁹⁸. L'hypothèse de travail sur la naissance de ce système éruptif est qu'il corresponde alors davantage à un SHGS, et plus particulièrement à une sous-catégorie de cette famille de système, un SHHS : un système hydrothermal en contexte sédimentaire.

Il ne s'agit donc plus d'un *mud volcano*, mais d'une structure où des intrusions magmatiques et des fluides géothermiques à haute température permettent à du CO₂ et à de la vapeur d'eau de traverser des couches sédimentaires organiquement riches conduisant à des remontées vers la surface de boue et de gaz d'origines complexes, sous forme d'éruption⁹⁹. Les SHGS/SHHS se distinguent donc des volcans sédimentaires classiques, mais aussi des structures purement volcano-thermales en raison de la part, certes faible, mais non négligeable, de CH₄ présente dans leurs émissions.

En effet, la composition isotopique des échantillons de gaz du volcan magmatique Welirang voisin a été comparée avec celle du Lusi¹⁰⁰. Il s'avère alors que les signatures chimiques des deux systèmes volcaniques partagent de nombreuses similarités. Ainsi de l'hélium d'origine magmatique qui est présent dans les deux cas. De même, la forte teneur en CO₂ corrobore l'hypothèse d'une influence ignée dans la formation des gaz. Cela renforce la probabilité d'une intrusion magmatique, et donc d'une interconnexion des deux structures volcaniques en profondeur, peut-être à plus de 4 km, dans la formation de Ngimbang¹⁰¹. La modélisation réalisée par l'équipe de H.H. SVENSEN rend d'ailleurs cohérente la présence d'un *sill* à ce niveau, pour expliquer les dégazages du LUSI¹⁰².

De même, les études du groupe de recherche dirigé par A. MAZZINI, portant sur l'analyse des eaux émises par le LUSI, ont montré que son système de drainage est plus profond que pensé au départ et est connecté, lui aussi, au complexe volcanique magmatique¹⁰³. La quantité d'eau éjectée sous forme de vapeur dominant largement les autres gaz (98% d'eau pour 1,5% de CO₂ et 0,5% de CH₄)¹⁰⁴ confirme la signature hydrothermale de ce système éruptif, le catégorisant plus spécifiquement en SHHS.

⁹⁸ MAZZINI, A., *op. cit.* (2018), p. 1-9

⁹⁹ MAZZINI, A., ETIOPE, G., *op. cit.*, p. 106-107

¹⁰⁰ IGUAGGIATO, S., *et al.*, « The Arjuno-Welirang volcanic complex and the connected Lusi system : Geochemical evidences », *Marine and Petroleum Geology*, n°90 (2018), p. 67-76

¹⁰¹ MAZZINI, A., *et al.*, « A new hydrothermal scenario for the 2006 Lusi eruption, Indonesia. Insights from gas geochemistry », *Earth and Planetary Science Letters*, 317–318 (2012), p. 316-317

¹⁰² SVENSEN, H.H., *et al.*, *op. cit.*, p. 201-208

¹⁰³ MAZZINI, A. *et al.*, « The geochemistry and origin of the hydrothermal water erupted at Lusi, Indonesia », *Marine and Petroleum Geology*, n°90 (2018), p. 52-66

¹⁰⁴ MAZZINI, A. *et al.*, *ibid.* (2012)

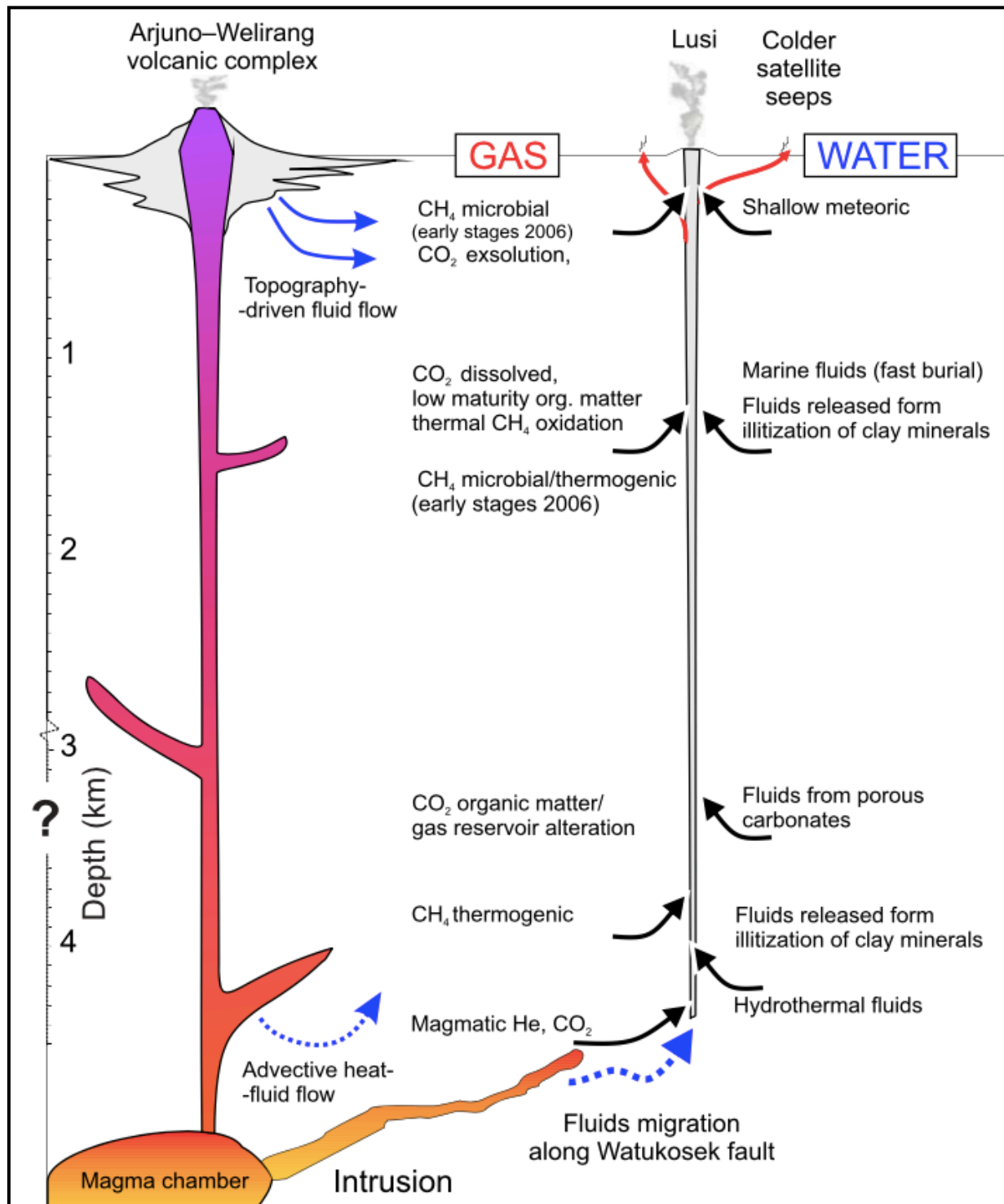


Figure 12 : Schéma en coupe des différentes sources d'eau et de gaz du LUSI, mettant en lumière les interactions entre le complexe magmatique de l'Arjuno-Welirang et ce volcan de boue particulier

Source : A. Mazzini et al., *Marine and Petroleum Geology* n°90, 2018

La migration des fluides (gaz, eau) de l'Arjuno-Welirang emprunterait donc la faille de Watukosek, et, au contact des sédiments organiquement riches, déclencherait des réactions métaphoriques et une surpression des fluides dans une couche déjà instable, remontant jusqu'à la surface. Le bassin sédimentaire sous le LUSI aurait ainsi été déstabilisé par cette intrusion ignée. Le LUSI serait donc une structure hybride, à mi-chemin entre les volcanismes magmatique et sédimentaire, telle que représentée synthétiquement par la **figure 12**.

3. Le LUSI, un système de type geyser ?

Le groupe de travail conduit par K. KARYONO a mené une campagne de collectes de données d'observations de surface et de subsurface entre 2014 et 2015 afin de mettre à l'épreuve le scénario du SHHS pour le LUSI¹⁰⁵. Un rythme d'éruption en 4 phases (visibles en **figure 13**, *infra*), se répétant cycliquement suivant la même chronologie, a ainsi été mis en évidence par l'équipe :

- une activité bouillonnante régulière (**A sur la figure 13**) avec émission de *mud breccia*, d'eau, mais aussi de gaz (incluant la vapeur d'eau). La durée de cette manifestation oscille entre 5 et 10 mn, rarement davantage.
- Des geysers détritiques où l'émission de vapeur est réduite, mais celle de boue est importante dans la zone du cratère (**B**), avec des bulles atteignant jusqu'à 10 m. de diamètre et de hauteur. Cette phase est brève, de l'ordre de 30 secondes.
- Puis, un troisième stade (**C**) consiste, durant 2 à 10 mn, en des geysers détritiques accompagnés d'une imposante vapeur d'eau et d'un dégazage bruyant. Le panache peut atteindre 100 m. de haut. Beaucoup d'eau est également éjecté lors de cette étape, avec une augmentation significative des débits des torrents de boue s'écoulant de façon radiale depuis le cratère.
- La dernière phase (**D**) correspond au repos complet du système, sans aucune émission de gaz ni de boue, pendant 1 à 2 minutes.

Ce cycle en 4 phases se répète, donnant au système un comportement éruptif par pulsation. La périodicité de ces cycles est cependant changeante depuis la début de l'éruption, variant de 30 minutes en septembre 2006 à 15 minutes en 2017. Elle a même pu être d'une heure

¹⁰⁵ KARYONO, K. et al., « Lusi, a clastic-dominated geysering system in Indonesia recently explored by surface and subsurface observations », *Terra Nova*, vol. 29, n°1 (2017), p. 13-19

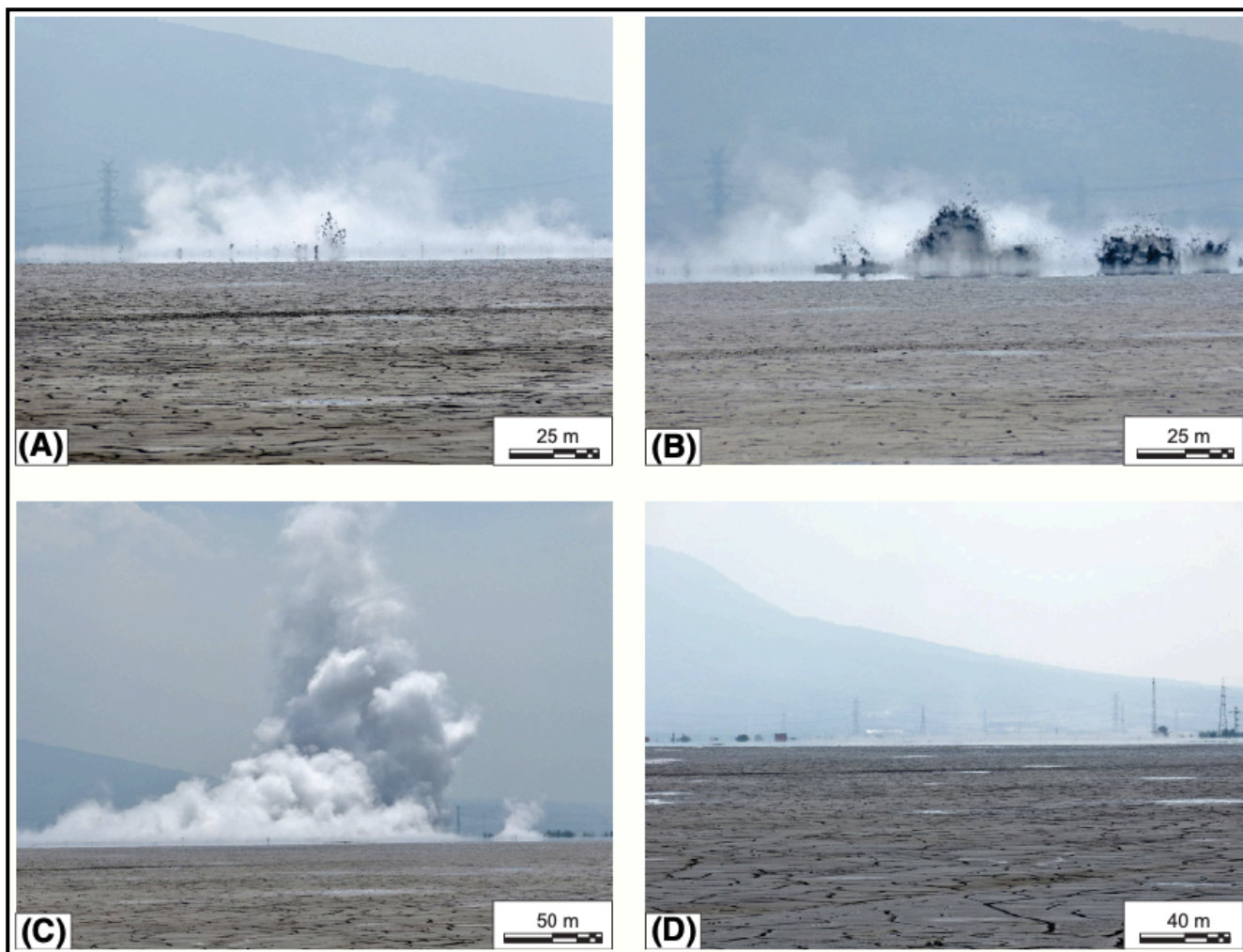


Figure 13 : Les 4 étapes du cycle éruptif du LUSI

A :Activité régulière bouillonnante ; **B** : geysers détritiques; **C** : geysers détritiques avec forte émission de vapeur d'eau ; **D** : phase de repos total

Source : K. Karyono et al., *Terra Nova*, vol. 29, 2017

et demi en 2007. Les phases B et C sont associées à « des trémors dont les accents harmoniques ressemblent parfois à ceux dus au magma des volcans classiques »¹⁰⁶.

K. KARYONO propose alors le modèle suivant de fonctionnement du LUSI : les fluides hydrothermaux profonds et à haute température remontent à travers les fractures des unités géologiques ; ceux-ci atteignent un réservoir d'accumulation localisé entre 1 et 1,5 km de profondeur, lequel enfle et désenfle au rythme des débits parvenant au réservoir ; ils sont ensuite expulsés vers la surface par un canal d'alimentation qui permet de relâcher la vapeur d'eau, le CO₂ et le CH₄, en fonction de l'explosion des bulles de gaz qui initient l'activité sous forme de geysers.

Pour cette équipe de recherche, le LUSI correspondrait ainsi au premier exemple documenté de SHHS ayant une activité de geyser dominé par des débris clastiques.

¹⁰⁶ *Ibid.*

CONCLUSION DE LA PREMIÈRE PARTIE

Le LUSI, un événement volcanique à part

Volcans magmatiques et volcans sédimentaires partagent ainsi de nombreuses similitudes. Celles-ci dépassent la simple ressemblance morphologique en surface, souvent conique ou en dôme dans les deux cas. En effet, les dynamismes éruptifs présentent également des points de comparaison. Si la matière éruptive est lavique pour l'un, boueuse (*mud breccia*) pour l'autre, les 4 classes volcaniques qui se distinguent peuvent s'appliquer aux deux types de structures, en se fondant sur les 3 pôles de leurs émissions (liquide, solide, gazeux). De même, les types de phase d'activité et les fréquences d'éruption sont globalement semblables. En profondeur, les contextes géologiques de formation tant des volcans magmatiques que des *mud volcanoes* ont pour rapprochement les zones de subduction de plaques tectoniques. La pression des fluides induisant leur remontée vers la surface à travers les couches géologiques fracturées obéit à des processus comparables, parfois favorisée, dans le deux cas, par l'activité sismique.

Toutefois, les intensités des éruptions diffèrent, celles magmatiques mobilisant des volumes de matériaux éjectés (laves et téphra) dans des proportions bien plus conséquentes que celles sédimentaires. Par ailleurs, la durée des éruptions des *mud volcanoes* est souvent courte, de quelques heures à quelques jours. En profondeur, l'alimentation des structures magmatiques dépend de la fusion des roches, tandis que celle des volcans de boue est liée à des sédiments en instabilité gravitaire dans une couche stratigraphique. La présence des *mud volcanoes* est par ailleurs liée à des contextes favorables à la production naturelle d'hydrocarbures.

Le LUSI survient à la croisée de ces deux systèmes volcaniques. S'apparentant à un volcan de boue par l'aspect général de ses émissions, la forme subaérienne en plateau qu'il prend (typique de la classe II), le contexte sédimentaire dans lequel il est né, le LUSI révèle pourtant des caractéristiques magmatiques. Ainsi, la forte teneur en CO₂ et en vapeur d'eau, de même que la composition isotopique de ces gaz, le fort gradient thermique mesuré à son aplomb, et le caractère inédit de la durée de l'éruption, ont mis certains scientifiques sur la piste d'un SHHS (sous-type des SHGS). En effet, l'alimentation du LUSI proviendrait de fluides hydrothermaux profonds, mis sous pression par l'apport de chaleur magmatique transmise le long de la faille de Watukosek. Le comportement de cette structure s'apparenterait alors à celui des geysers, mais avec une prédominance de débris détritiques, ce qui en serait une exception, la première ainsi documentée. La compréhension scientifique de ce phénomène naturel s'enrichit mais n'en est donc qu'à ses débuts. Force est de reconnaître que celui-ci constitue ainsi un aléa encore mal identifié, face aussi

bien aux volcans magmatiques classiques largement surveillés sur la planète, qu'aux volcans sédimentaires « froids » étudiés notamment dans les zones d'exploitation d'hydrocarbures.

Un volcan est généralement associé à divers dangers, en général bien appréhendés dans le cas des structures magmatiques (coulées de laves, retombées de téphra comme les coulées pyroclastiques, etc.). La terminologie de « volcan » utilisée également pour les systèmes sédimentaires (*mud volcanoes*), pourrait, quant à elle, induire des confusions dans les types d'aléas attendus pour les populations. Le LUSI n'est, toutefois, quant à lui pas évoqué comme un volcan en tant que tel par les habitants riverains, soumis à l'éruption. Ils emploient le terme de boue (*lumpur*) pour parler du phénomène, en référence à l'aléa principal caractérisant cette éruption et ses impacts sur le territoire du Sidoarjo. La distinction est établie avec le volcanisme classique, mais il n'en demeure pas moins que le LUSI a entraîné une catastrophe à l'échelle locale, dont les enjeux sont complexifiés par son caractère méconnu. Dans la suite de cette étude, le terme de *volcan de boue* pourra toutefois être encore employé pour désigner le LUSI, par commodité lexicale.

DEUXIÈME PARTIE

DE LA COMPRÉHENSION SCIENTIFIQUE AUX IMPLICATIONS SOCIÉTALES DU LUSI : LES FORMES DE GESTION TERRITORIALE D'UNE CATASTROPHE IMPRÉPARÉE S'INSCRIVANT DANS LA DURÉE

Le caractère inédit de l'éruption boueuse est souligné par les scientifiques qui étudient le LUSI, tant par son ampleur temporelle que par ses implications spatiales. Sa durée est en effet sans précédent connu parmi les volcans sédimentaires¹⁰⁷. C'est aussi celle ayant le plus d'impacts sur les populations par son extension en surface, en zone densément occupée¹⁰⁸, couvrant une surface de plus de 7 km². C'est la première fois qu'un système volcanique apparenté à un *mud volcano*, en l'occurrence ici un SHHS comme expliqué précédemment, représente un tel niveau de danger immédiat pour une société. Le LUSI est alors un risque duquel les habitants du Sidoarjo n'étaient pas avertis, et qui a la particularité de s'être déjà réalisé, la catastrophe ayant eu lieu¹⁰⁹ brutalement et de façon inattendue — et se poursuivant quinze années plus tard — sans qu'il y ait eu quelque préparation en amont de celle-ci, tant de la part des populations que des autorités publiques. Or, chaque risque implique un territoire, c'est-à-dire des acteurs de pouvoir spécifiques ainsi qu'un espace approprié par une population, desquels découlent une organisation particulière¹¹⁰. Il a donc fallu gérer pour l'ensemble des acteurs un risque qui n'a pas été construit socialement, sans représentations ni calculs économiques, dont ils n'ont pas pu percevoir les enjeux par anticipation sur le territoire impliqué.

En quoi cet aléa (l'éruption du volcan de boue) qui s'est produit a eu des conséquences sur les populations et les biens, affectant plus ou moins fortement le fonctionnement des sociétés locales¹¹¹ ? Quelles imbrications scalaires des enjeux la gestion de la catastrophe révèle-t-elle, à la lumière des réponses apportées par le territoire pour faire face au LUSI ?

¹⁰⁷ SVENSEN, H.H., *et al.*, *op. cit.*, p. 201

¹⁰⁸ KARYONO, K. *et al.*, *op. cit.*, p. 13

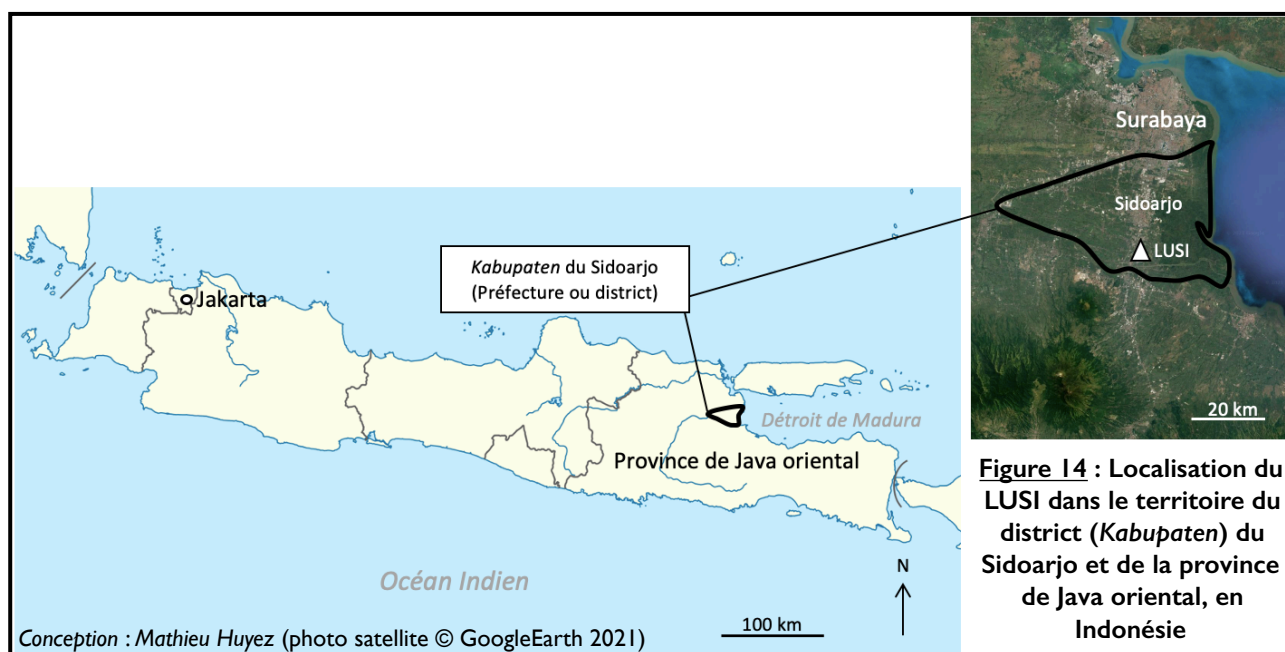
¹⁰⁹ La catastrophe est prise ici dans sa définition de « réalisation d'un risque qui était plus ou moins aléatoire jusqu'au moment de l'événement » d'après le rapport du 7^e séminaire de l'Institut des Hautes Etudes de la Sécurité Intérieure en 1996, in NOVEMBER, V., *Les territoires du risque*, Peter Lang SA, Berne (2002), p. 238

¹¹⁰ BEUCHER, S., REGHEZZA, M., VEYRET, Y. (dir.), *Les risques*, Bréal, Rosny-sous-Bois (2004), p. 14-15

¹¹¹ VEYRET, Y. *et al.*, *Les risques*, Sedes, Paris (2003), p. 27

C'est dans l'espace concerné (**figure 14**) par le risque que l'on « observe les aspects sociétaux, économiques, politiques et techniques qui se combinent »¹¹², qui plus est lorsque le risque est réalisé et devient une catastrophe, comme dans l'exemple du LUSI. Dans le cas de l'éruption du *Lumpur Sidoarjo*, des questions fondamentales sur les caractéristiques de cet aléa inédit conditionnent sa gestion. Si l'observation scientifique du phénomène est nécessaire pour les réponses apportées à la crise induite, elle « suppose aussi une analyse des vulnérabilités, des capacités d'adaptation des populations, de leur éventuelle résilience » à la catastrophe¹¹³. Les éléments de compréhension scientifique, notamment quant à la durée de l'éruption et à l'origine naturelle discutée de l'aléa, sont en effet sujet à débat, et peuvent orienter les décisions et choix des autorités gestionnaires et influencer sur le jeu des dédommagements économiques. Les mesures actées orientent les trajectoires de résilience à plusieurs niveaux scalaires, augmentant parfois la vulnérabilité territoriale, s'accompagnant d'impacts environnementaux, et humains. La perception du désastre, par la population recherchant des responsables, est donc aussi un enjeu de la gestion de l'éruption boueuse. L'approche technique ne doit alors pas occulter la dimension humaniste¹¹⁴ des réponses à la catastrophe, comme la question des formes de résilience possibles des habitants affectés, en interrogeant leur capacité à faire face à ce désastre du temps long.

La gestion du LUSI, par les différents acteurs impliqués, réorganise donc l'espace en question, et dépasse l'échelle locale, par effet domino, dans un système d'interactions scalaires complexe entre vulnérabilités et types de résilience du territoire.



¹¹² NOVEMBER, V., *op. cit.*, p. 113

¹¹³ BECERRA, S., PELTIER, A. (dirs.), *op. cit.*, p. 9

¹¹⁴ *Ibid.*, p. 18

CHAPITRE I - UN ALÉA ENCORE MAL CERNÉ PAR LES SCIENTIFIQUES

I. La thèse du déclenchement accidentel de ce phénomène naturel

La part anthropique dans l'origine d'une catastrophe est un sujet inhérent à la question des risques dits « naturels ». Un phénomène naturel ne représente en effet un danger que dès lors qu'il y a une société. Cette dernière expose des enjeux (marchands et non marchands) face à cet aléa, et elle devient donc plus ou moins vulnérable en fonction de ceux-ci¹¹⁵.

Mais l'aléa lui-même peut être exacerbé par l'Homme. Ainsi, un danger qui peut paraître naturel est parfois déclenché par l'action humaine : celui-ci peut être alors désigné comme un « aléa naturel anthropisé »¹¹⁶. Dans le cas des éruptions volcaniques magmatiques, le seul exemple connu est celui de la région de Krafla en 1977, en Islande. Un puits de forage géothermique, à 1138 m de profondeur, est entré au contact du magma, provoquant l'éruption d'un mètre cube de scories, empruntant le conduit créé par cette opération industrielle¹¹⁷.

C'est cette thèse d'un accident de forage que certains scientifiques soutiennent afin d'expliquer l'éruption du LUSI. L'exploitation du sous-sol riche en hydrocarbures par la société *Lapindo Brantas* est désignée comme responsable des remontées boueuses, à l'instar des conclusions des travaux de l'équipe menée par R.J. DAVIES. Les puits sont réalisés de telle sorte à ce que la pression à l'intérieur du conduit soit supérieure à celle des fluides des strates rocheuses percées, grâce à l'injection de boue de forage. Entre les 27 et 28 mai 2006, un important afflux d'eau et de gaz s'est fait dans le puits BJPI dans le district de Sidoarjo : le volume de matière dans la colonne minée aurait donc eu une densité diluée, i.e. plus faible, ce qui a permis de faire remonter les boues de forage vers la surface, par appel d'air¹¹⁸. Une quantité insuffisante de boue aurait ainsi été utilisée pour remplacer le volume extrait de la tige de forage, déséquilibrant les pressions entre le puits et les fluides des couches sédimentaires environnantes, lesquels ont pénétré le forage. Les valves de sécurité ont alors été fermées par l'entreprise pour stopper cet afflux. Cela a entraîné une augmentation des pressions dans la tige de forage, montrant que les fluides continuaient à se déverser dans le puits. Or, une baisse de contrainte a eu lieu entre 90 et

¹¹⁵ ANTOINE, J.-M. (dir.) et al., *Les mots des risques naturels*, Presses Universitaires du Mirail, Toulouse (2008), p. 100-116

¹¹⁶ DAUPHINE, A., PROVITOLLO, D., *op. cit.*, p. 128

¹¹⁷ SCHNEIDER, J.-L., *Les traumatismes de la Terre*, Vuibert, Paris (2009), p. 150

¹¹⁸ DAVIES, R.J et al., « The East Java mud volcano (2006 to present): An earthquake or drilling trigger? », *Earth and Planetary Science Letters*, n°272 (2008), p. 627-638

135 minutes, alors que les opérations de pompage étaient à l'arrêt. Cela corrobore, pour ces auteurs, l'hypothèse d'une fuite, de l'enveloppe du forage vers les couches sédimentaires environnantes (**figure 15**) : les fluides sous pression auraient alors créé un réseau de fractures hydrauliques et se seraient évacués vers la surface, à 200 mètres environ du forage. Cette brèche aurait ainsi été initiée au moment de la fermeture du puits, lorsque la pression à l'intérieur de celui-ci était à son apogée.

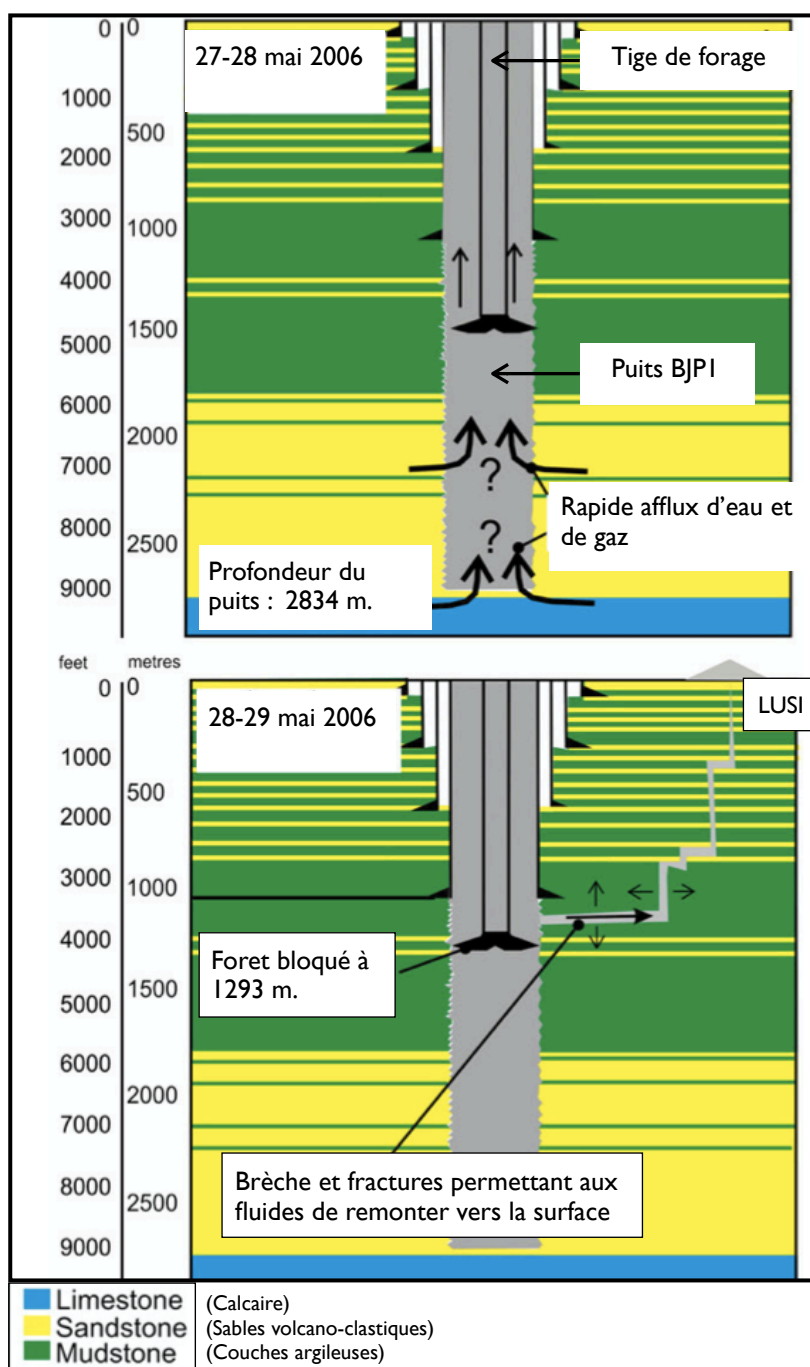


Figure 15 : Vue en coupe schématique du puits de forage pétrolier avec remontée accidentelle des boues de forage et fluides des couches sédimentaires vers la surface
Source : R.J. Davies et al., *Earth and Planetary Science Letters*, n°272, 2008

2. L'hypothèse d'un affaiblissement des couches par la sismicité de faille

Cette théorie de l'accident ne convainc cependant pas d'autres chercheurs. Ainsi d'Adriano MAZZINI pour qui le séisme de Yogyakarta du 27 mai 2006, deux jours avant les premières éruptions de boue du LUSI, semble avoir joué un rôle prépondérant¹¹⁹.

— En effet, l'absence de remontée de fluides par le puits BJP1 lui-même ne plaide pas en faveur d'un accident de forage à l'image de celui de la plateforme Bravo en 1977¹²⁰, d'une part.

— Les profils sismiques de la subsurface réalisés dans la zone du LUSI avant 2006 présentent, d'autre part, une structure en diapir, et donc un contexte favorable à la formation de *mud volcano*es.

— Enfin, les sites éruptifs apparus à partir du 29 mai 2006 semblent s'aligner sur une faille axée Sud-Ouest/Nord-Est, dans le prolongement de celle de Watukosek (cf. **figure 16**).

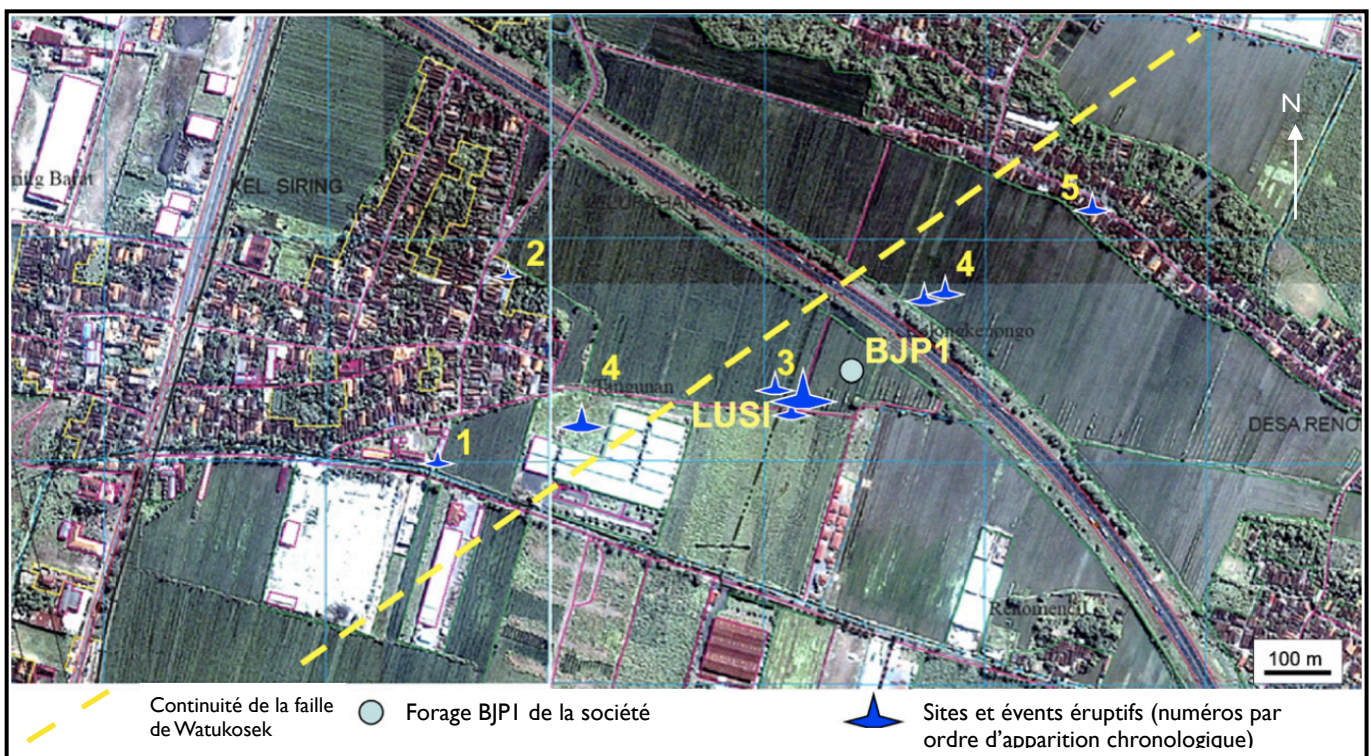


Figure 16 : Répartition des sites éruptifs et événements apparus la première semaine d'éruption du LUSI, avec alignement le long de la faille de Watukosek (photo satellite avant l'éruption - 2006)

Source : A. Mazzini et al., *Earth and Planetary Science Letters*, 2007

C'est donc le séisme précédent l'apparition du LUSI qui semble avoir été capable de fracturer les couches sédimentaires, en réactivant une faille préexistante, affectant de fait la perméabilité de celles-ci et la pression des fluides qu'elles contiennent. L'épicentre du séisme de

¹¹⁹ MAZZINI, A. et al., « Triggering and dynamic evolution of the LUSI mud volcano, Indonesia », *Earth and Planetary Science Letters*, n°261 (2007), p. 375-388

¹²⁰ Accident survenu le 22 avril 1977 en Mer du Nord, avec éruption des boues de forage puis de pétrole.

Yogyakarta, de magnitude 6,3 sur l'échelle de Richter, s'est produit à 200 km du site en question. Cela paraît trop faible et trop lointain pour certains scientifiques comme R.J. DAVIES. Le gradient intensité/distance pour déduire l'impact d'un séisme sur une éruption sédimentaire est très complexe à mesurer. Aussi, les mêmes mécanismes n'aboutissent-ils pas aux mêmes conséquences en matière de relation séisme/*mud volcano*¹²¹. De même, déterminer lesquels prévalent dans le déclenchement d'une éruption est difficile à définir. Dans le cas du LUSI, des séismes plus violents dans la région et antérieurs à celui de Yogyakarta n'ont pas abouti à cette éruption. D'autre part, en examinant le dynamisme éruptif du système, il est constaté que les tremblements de terre des 6, 8 et 22 septembre 2006 ont été suivis d'une augmentation de l'activité du LUSI, mais un tel changement a également eu lieu aux mois d'octobre et novembre suivants, sans être précédé de secousses telluriques¹²². L'équipe de M. MANGA souligne toutefois que les systèmes de type geyser sont très sensibles aux ondes sismiques qui se propagent à leurs subsurfaces, ce qui induirait alors une corrélation entre tremblements de terre et pulsations d'activité dans le cas du LUSI, considéré en tant que SHHS avec comportement de geyser¹²³.

Si R.J. DAVIES note qu'il n'y a pas de preuves quant à une répétition de secousses ayant conduit la subsurface du LUSI à un état critique avant que ne survienne le séisme du 27 mai, A. MAZZINI évoque donc, quant à lui, la possibilité d'une somme d'événements passés ayant préparé cette éruption, avec un séisme modéré suffisant comme déclencheur ou réactivateur de fractures préexistantes, déstabilisant la pression des fluides dans les couches sédimentaires, affectant les canaux d'alimentation vers la surface.

Il est important de noter que ces études sur l'origine davantage naturelle ou artificielle citées dans ce chapitre ont été réalisées par des chercheurs indépendants, à la fois de l'entreprise *Lapindo Brantas* et du gouvernement indonésien¹²⁴. En effet, la compagnie d'hydrocarbures soutient la thèse naturelle tandis les pouvoirs publics ont d'abord mis en avant l'hypothèse de l'erreur anthropique, avant de se rallier eux aussi à la cause naturelle, dans un jeu de rejets des responsabilités pour la gestion des dommages liés à la catastrophe ayant glissé vers une connivence d'intérêts de ces deux acteurs gestionnaires (voir Chapitre 2, *infra*). Les publications scientifiques

¹²¹ MANGA, M., et al., « Earthquake triggering of mud volcanoes », *Marine and Petroleum Geology*, n°26 (2009), p. 1785-1798

¹²² *Ibid*, p. 1789

¹²³ K. KARYONO catégorise LUSI en SHHS ayant une activité de geyser dominé par des débris clastiques, cf. Partie I ch. 3

¹²⁴ Cependant, on ne peut exclure des collusions à une autre échelle. Ainsi, le géologue A. MAZZINI bénéficierait pour ses recherches de financements provenant en partie du secteur pétrolier norvégien, influant peut-être sur l'orientation de ses travaux, en privilégiant alors une cause naturelle afin de ne pas incriminer une compagnie d'hydrocarbures. D'après l'entretien réalisé avec F. ODONNE.

locales, quant à elles, abondent dans le sens choisi par le gouvernement dans la mesure où ce dernier régule les parutions des études¹²⁵, limitant l'indépendance de la recherche indonésienne et le contrôle par les pairs, dans un pays où la manne pétrolière pèse dans l'économie¹²⁶.

Une autre interrogation scientifique impliquant les fondements de l'aléa en lui-même a des conséquences sur la gestion de la catastrophe : l'estimation de son étalement dans le temps.

3. Une éruption d'une durée indéfinie ?

Une catastrophe implique une temporalité spécifique qui doit être pensée « en termes de crise, i.e. de discontinuité (...) brutale »¹²⁷. Elle affiche donc un certain déroulé. Dans le cas de l'éruption du LUSI, la durée de la catastrophe s'étire de 2006 à nos jours, et n'est toujours pas achevée, ce qui en fait un événement exceptionnel. Au bout d'une année d'activité, d'aucuns soulignaient déjà le caractère inédit de la continuité des émissions de ce *mud volcano*¹²⁸, tandis que la plupart des éruptions des volcans sédimentaires s'éteignent au bout de quelques heures, voire quelques jours.

Cet étalement dans le temps ne semble pas être corrélé à une diminution nette de l'activité. Si le pic mesuré a été atteint en septembre 2006, autour de 180 000 m³/jour de *mud breccia* et d'eau liquide éruptées¹²⁹, les débits oscillent ces dernières années à des niveaux qui restent élevés, souvent compris entre 10 000 et 50 000 m³/jour¹³⁰. A cela s'ajoutent les gaz, mais dont les mesures sont rarement documentées.

La prévision quant à la durée totale de l'éruption est sujet à analyse, sans qu'aucune certitude n'en émerge. Elle ramène aux questionnements sur l'origine des fluides alimentant l'éruption. En effet, l'activité éruptive d'un système de ce type dépend d'une pression d'eau supérieure à celle de la boue et des gaz dans les couches sédimentaires. Quand ces deux pressions

¹²⁵ DRAKE, P., *op. cit.* (2016), p. 348

¹²⁶ Le géologue indonésien R.P. KOESOEMADINATA a ainsi par exemple regretté l'absence de discussions sur la thèse d'une négligence de la part de *Lapindo Brantas* lors du comité organisé sur le LUSI par l'Alliance des Géologues Indonésiens, en février 2007. D'après SCHILLER, J., et al., « Learning from the East Java mudflow - disaster politics in Indonesia », *Indonesia*, n°85 (2008), p. 70

Cela se fait donc au moment où l'avis officiel du gouvernement abandonne la thèse accidentelle pour se rallier à l'origine naturelle de l'éruption, convergeant alors vers les intérêts de la compagnie pétrolière.

¹²⁷ BEUCHER, S., REGHEZZA, M., VEYRET, Y. (dir.), *ibid.*

¹²⁸ MAZZINI, A. et al., *op. cit.* (2007), p. 376

¹²⁹ *Ibid.*, p. 382

¹³⁰ BADJA PRATAMA, B. et al., *op. cit.*, p. 1

parviennent à s'équilibrer, le débit de matières émises se tarit progressivement jusqu'à la fin de l'éruption¹³¹. Les modèles proposés s'appuient donc notamment sur une donnée fondamentale parmi celles qui les conditionnent : l'origine de l'eau soumise à de hautes températures.

L'équipe de R.J. DAVIES s'appuie sur les faits que le gradient géothermique est de 42°C par km et que l'eau éruptée par le LUSI affiche une température d'environ 100°C, pour localiser la source d'eau alimentant ce système à une profondeur d'au moins 2400 m. Elle serait donc contenue dans une couche calcaire, dans la formation Prupuh datant du Miocène (**figure 17**). Cette eau aurait été dépressurisée par le forage pétrolier BPJI, suivant l'hypothèse du déclenchement accidentel évoqué *supra*. Partant de là, le modèle propose une probabilité de 50% d'une réduction des débits des émissions de matières (solide et liquide) sous les 100 m³/jour en 26 ans, et 95% de chance d'atteindre ce rythme en 100 ans¹³². Mais cette étude précise par ailleurs

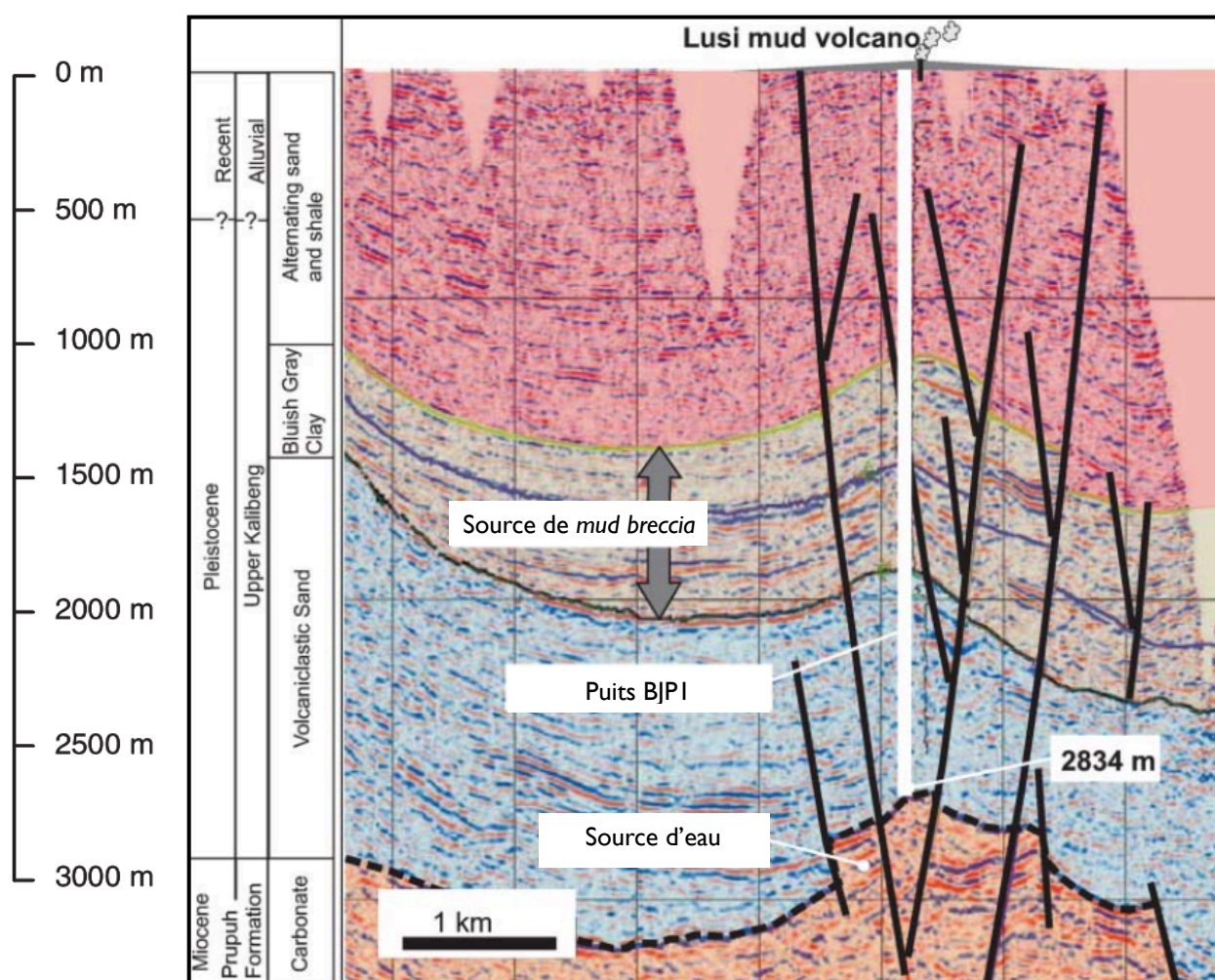


Figure 17 : Couches stratigraphiques et sources des fluides migrant vers la surface (hypothèse corroborant l'accident de forage du puits BJPI)

Source : d'après R.J. Davies et al., *Journal of the Geological Society*, 2011

¹³¹ DAVIES, R.J., et al., « Probabilistic longevity estimate for the LUSI mud volcano, East Java », *Journal of the Geological Society*, vol. 168 (2011), p. 519-520

¹³² *Ibid.*, p. 521

que des flux à des taux encore plus faibles sont probables sur des milliers d'années. A cela, une subsidence de la structure est modélisée comme pouvant atteindre 95 à 475 m, une fois l'ensemble des boues potentielles éruptées.

Les travaux conduits par M. L. RUDOLPH¹³³ s'appuient également sur une origine de l'eau provenant de l'aquifère évoqué *supra*, mais estiment quant à eux que cette source ne joue un rôle qu'à l'enclenchement initial de l'éruption du LUSI. Ainsi, ils argumentent que l'éruption est maintenue par le principe chimique d'exsolution, i.e. le procédé de séparation des constituants. Des gaz se forment à l'intérieur de la couche réservoir de boue, conduisant aux émissions du *mud volcano*. Ils incluent également le facteur de création d'une caldeira par subsidence comme scénario de fin pour l'éruption. La modélisation aboutit ainsi à une probabilité de 50% d'une éruption s'arrêtant avant 41 ans et à 33% de chance d'une durée de celle-ci supérieure à 84 ans.

Toutefois, ces deux scénarios ne tiennent pas compte d'une source externe de mise sous pression des fluides profonds, notamment liée à la proximité du complexe volcanique de l'Arjuno-Welirang et leur propagation par la faille de Watukosek, dans le cadre de l'hypothèse d'un SHHS sous-tendant le LUSI¹³⁴. Les intrusions de fluides hydrothermaux (d'eau), portées à très haute température du fait du réchauffement par la chambre magmatique, entraîne une incertitude encore plus grande quant à la longévité probable de l'éruption. M.L. RUDOLPH reconnaît ainsi que l'inclusion de ce paramètre allongerait considérablement la durée des émissions à la surface de ce volcan sédimentaire, alors constamment alimentées en profondeur¹³⁵.

L'éruption du LUSI est ainsi sans durée précisément déterminée, mais prévue s'étendre sur au moins plusieurs décennies. Elle semble donc n'être, somme toute, qu'à ses débuts. Le temps de la catastrophe ainsi non délimité complique sa gestion, et au premier chef son intégration par la population locale. Comment les différents acteurs décisionnaires s'adaptent-ils à la durée inconnue de ce phénomène et à ses conséquences spatiales induites, en expulsant continuellement des boues ? Dans quelle mesure les habitants soumis à ce désastre ont-ils, par exemple, entamer une résilience, alors même que la catastrophe est encore en cours de réalisation et pourrait s'étaler sur plusieurs générations ? Les chapitres 2 et 3 (*infra*) tenteront d'apporter des éléments de réponse à ces interrogations.

¹³³ RUDOLPH, M.L., et al., « A prediction of the longevity of the Lusi mud eruption, Indonesia », *Earth and Planetary Science Letters*, n°308 (2011), p.124-130

¹³⁴ Conclusion du LUSI LAB PROJECT, notamment de MAZZINI, A., INGUAGGIATO, S., KARYONO, K.

¹³⁵ RUDOLPH, M.L., et al., *op.cit.*, p.129-130

L'aléa que constitue cette éruption boueuse conserve des incertitudes, diluant les contours de la catastrophe. L'origine naturelle ou accidentelle du déclencheur du désastre est sujet à débat, conditionnant l'enjeu de gestion de celle-ci par les autorités locales à celui de l'enjeu de la recherche scientifique. La durée encore imprécise de l'éruption du LUSI en l'état actuel de la connaissance, ne permet pas de délimiter dans le temps, ni dans l'espace cette catastrophe.

En effet, sans perspective de fin, le défi de la gestion de ce risque en cours de réalisation se pose dans ce territoire soumis au déversement quotidien de *mud breccia*, et à l'expulsion de gaz. La longévité de l'éruption, ensevelissant peu à peu le district de Sidoarjo, complique la gestion des impacts du LUSI.

Le chapitre suivant s'emploiera ainsi à mettre en relation la catastrophe et l'espace dans lequel elle prend place. Les conséquences du désastre s'inscrivent en effet durablement dans le district, et le modifie profondément, sur le temps long. L'éruption du LUSI implique également une gestion spécifique qui doit s'adapter dans le temps aux aléas et se les approprier. Cette gestion influence également la spatialisation de la catastrophe elle-même, parfois même au-delà de la zone directement impactée, et faisant émerger de nouveaux risques.

CHAPITRE II - LA CATASTROPHE DANS L'ESPACE-TEMPS : RÉDUIRE UNE CRISE AUX CONTOURS SPATIO-TEMPORELS MOUVANTS

I. L'ampleur spatiale de l'éruption du LUSI : éléments diachroniques des impacts évolutifs

Les dommages humains liés à l'éruption s'élèvent officiellement à 13 décès, dûs à l'explosion d'un gazoduc sous le poids de la boue éructée par le LUSI¹³⁶, mais aucune victime directe n'est répertoriée. Les émanations de gaz ont conduit à l'hospitalisation de 1500 personnes durant la première année d'après le décompte de l'ONG *Friends of the Earth*, avec tout de même 28 247 passages recensés dans les hôpitaux de jour du district de Sidoarjo pour des problèmes respiratoires dans les 3 premiers mois de l'éruption¹³⁷, mais aucune conséquence létale n'a été déplorée officiellement. Les conséquences matérielles sont quant à elles étendues et documentées.

Les flots de boue ont en effet lentement mais inexorablement englouti (**figures 18a et 18b, infra**), en tout ou partie, une douzaine de villages depuis le début de l'éruption en 2006. Au bout d'une année, 10 426 maisons, 33 écoles, 31 usines, 65 lieux de culte, 28 écoles religieuses, et près de 500 ha de terres cultivées étaient déjà submergés, ainsi qu'un axe routier majeur reliant le nord et le sud de la province de Java oriental (autoroute à péage), et une ligne électrique à haute tension¹³⁸. L'épaisseur de la couche de boue dépasse actuellement les 20 mètres, à l'intérieur des digues qui ont été construites. Cela transforme le paysage qui devient méconnaissable pour les habitants. Au-delà des limites matérialisées par les levées, la subsidence que subit la région entraîne des affaissements des structures dans un rayon d'environ 10 km autour du cratère¹³⁹, conduisant à l'abandon progressif d'autres espaces, devenus inhabitables également (**figure 19, infra**). Ces déformations du sol induites par la vidange des boues sous la structure occasionnent aussi des ruptures dans les digues qui menacent d'inonder de nouvelles zones et qu'il faut régulièrement colmater. Plus de 40 000 personnes avaient déjà dû fuir leur maison 12 ans après le début de la catastrophe¹⁴⁰.

¹³⁶ DAVIES, R.J., SWARBRICK, R., « Lusi'cough - a diagnosis », *Geology Today*, vol. 23, n°5 (2007), p. 166

¹³⁷ SCHILLER, J., et al., *op. cit.*, p. 71

¹³⁸ MUHTADA, D., « Ethics, Economics and Environmental Complexity : The Mud Flow Disaster in East Java », *Systems Research and Behavioral Science* (2008), p. 187

¹³⁹ DEQUINCEY, O., *op. cit.*

¹⁴⁰ DRAKE, P., « Indonesia's Accidental Island: Composing the Environment in the Echo of Disaster », *Environmental Communication*, vol. 12 (2018), p. 261-273



Figure 18a : Vue aérienne oblique de la zone inondée par l'éruption (panache blanc), au bout d'une année

En cartouche : La boue s'assèche avec le temps, dans les zones les plus éloignées du cratère.

© Reuters, 2007



Figure 18b : Vue aérienne oblique de la zone inondée par l'éruption, au bout d'une dizaine d'années, suivant un axe est-sud-est/ouest-nord ouest

Noter l'urbanisation importante de la région au Nord du LUSI, les nombreuses rizières à l'est et à l'ouest de la zone endiguée, et l'autoroute à péage coupée.

© Hansi Maron, 2017



Figure 19 : Maison dégradée et rendue inhabitable par la subsidence de la zone, au sud-est du périmètre endigué contre les flots de boue © Cahill Kece, 2019



Figure 20 : Photo aérienne oblique prise par drone en limite nord-ouest du périmètre endigué du LUSI, dans le secteur du village de Ketapang protégé par une levée © Raja Drone, janvier 2021

L'axe ferroviaire est situé en contre-bas, de même que la voie routière Jalan Arteri Porong, connectée par un rond-point à l'autoroute à péage reconstruite plus à l'ouest, ralliant la capitale de province, Surabaya. Ces enjeux de transport sont exposés au risque d'inondation par les boues en cas de rupture de digue, augmentant la vulnérabilité de ce territoire.

L'emprise spatiale de la catastrophe à travers le temps peut être observée par satellite (**figure 21**, ci-après) et soulève la question des enjeux déjà affectés et ceux menacés par les aléas liés au LUSI, au premier chef desquels l'étalement progressif de la boue.

La zone couverte par les émissions solides, liquides et gazeuses du LUSI étaient, avant l'éruption de 2006, une zone densément peuplée, de 617 à 2620 hab/km² dans les 3 sous-districts concernés (d'après les données statistiques gouvernementales indonésiennes les plus récentes, datant de 2010). En 2005, avant la catastrophe, l'occupation du sol du secteur, incluant la zone de l'éruption et ses alentours immédiats (sur environ 16 km², correspondant *grosso modo* aux contours des photos satellites de la **figure 21**), était dominée par des rizières (à 47%) et une urbanisation informelle (32%) et planifiée (10%). Plus d'une décennie après le début de celle-ci, en 2017, la boue domine la zone affectée, suivi des zones abandonnées ou sans affectation (22%), tandis que les espaces agricoles ne représentent plus que 14% et l'urbanisation illégale et formelle respectivement 12% et 5%. Ces données sont issues de l'analyse spatiale à partir d'images satellites, par les travaux de l'équipe menée par J. EKAWATI, publiés en 2020¹⁴¹ et que nous synthétisons en **tableau 4** (*infra*). Elles mettent en exergue les pertes concernant l'activité économique de la zone sinistrée, dominée par l'agriculture. Le nombre de chômeurs et de personnes sans revenus a donc de fait considérablement augmenté. D'autre part, la disparition sous les boues de l'habitat informel ainsi constaté soulève la question du dédommagement de leurs occupants, ne pouvant bénéficier des indemnisations, faute de prouver leur statut de propriétaire. Ces deux facteurs ont-ils poussés les villageois des zones affectées à migrer vers d'autres centres urbains, notamment Surabaya, deuxième ville la plus peuplée d'Indonésie, située à 20 km au nord ? Cela pourrait en partie expliquer l'accroissement des surfaces de terres abandonnées, qui ont septuplé entre 2005 et 2017 (visible sur la **figure 21**), mais il faudrait une analyse plus fine des comportements d'exode rural observés dans le secteur. Cela pose aussi la question du déracinement socio-culturel des populations affectées.

Tableau 4 : Evolution des types d'occupation du sol dans la zone impactée par l'éruption du LUSI (en %)
(D'après J. EKAWATI, et al., *IOP Conference Series*, 2020)

Type d'occupation du sol (%)	En 2005	En 2006	En 2010	En 2017
Zones agricoles	46,9	39,2	20,0	14,5
Zones d'urbanisation planifiée	9,9	9,9	4,9	5,2
Zones d'urbanisation informelle	31,9	31,9	21,6	12,4
Zones vides ou abandonnées	3,1	4,2	12,9	22,1

¹⁴¹ EKAWATI, J, et al., « Analysis of GIS-Based Disaster Risk and Land Use Changes in The Impacted Area of Mudflow Disaster Lapindo », *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, n°409 (2020), p. 1-13



Figure 21 : Evolution de l'emprise spatiale de la boue du LUSI
© CRISP, GoogleEarth, 2005 à 2021

(a) En 2005, cette partie du district du Sidoarjo est à la fois densément peuplée et exploitée par la riziculture. **(b)** Un an après le début de l'éruption, en 2007, les boues se répandent sur les espaces occupés par les activités humaines et l'axe routier. Un réseau de digues, intérieures et extérieures, orientées vers le sud, tente de circonscrire la catastrophe. Une chenalisation des boues vers la rivière Porong a été mise en place **(c)** Les digues intérieures sont totalement submergées sur la photo de 2013, tandis que celles périphériques ont été renforcées dans les parties nord et est, en élargissant le périmètre de protection. Noter la construction (en blanc) de la bretelle d'accès au nouveau tronçon d'autoroute, au nord-ouest. **(d)** L'image la plus récente (2021) révèle le confortement du périmètre endigué, encore élargi au nord, et confirme l'abandon d'espaces urbanisés, au sud, à l'ouest et au nord-ouest.

Les aléas liés à cette éruption (écoulement de boue, affaissement de terrain, émanations de gaz par des suintements autour de la zone éruptive, parfois dans des zones encore habitées) continuent d'avoir lieu et prolongent ainsi spatio-temporellement la catastrophe. Cela interroge la spatialisation du risque : quels secteurs encore épargnés sont sous la menace du *mud volcano* ? Quel sont les différents niveaux de risque auxquels sont soumis les villages jouxtant notamment la zone actuellement endiguée ? En tenant compte de ces dangers potentiels, mais aussi des enjeux en terme de densité de population et d'infrastructures à protéger, les travaux du groupe de recherche mené par J. EKAWATI ont tenté de définir les secteurs les plus vulnérables¹⁴². Les zones d'habitation à l'ouest immédiat du LUSI sont ainsi les plus à risque, car situées dans la zone d'expansion actuelle des coulées de boue et comportant le plus de suintements gazeux, ainsi que des enjeux économiques matérialisés par des axes de transport structurants (**figure 20, supra**) : une voie ferroviaire et une route asphaltée secondaire, la « Jalan Arteri Porong », permettant de relier Sidoarjo, le chef-lieu du district, ainsi que Surabaya, la capitale provinciale, et connectée à la nouvelle autoroute à péage, détruite par le LUSI et reconstruite plus à l'ouest. Ce zonage de vulnérabilité, qui doit encore être intégré aux plans d'urbanisme officiels, inclut également le nouveau danger que représente les ruptures de digues. La répartition spatiale des différents niveaux de risque suivant les secteurs entourant LUSI sont reportés sur notre carte de synthèse (**figure 24, infra**).

Le territoire de la catastrophe s'agrandit donc, et l'évolution dans le temps de l'espace soumis aux dangers de l'éruption du LUSI tente d'être prévue. Cela pose la question de la difficile mise en place des plans d'action pour faire face à cette catastrophe mouvante, et qu'il faut d'abord réussir à contenir. Si rien ne peut être fait contre les émanations de gaz, les autorités tentent toutefois de protéger le territoire de l'invasion par la boue.

2. Contenir et évacuer les boues du LUSI : quelle spatialisation de la catastrophe la gestion aléa-centrée induit-elle ?

La forme de gestion d'un phénomène naturel, choisie par les décideurs institutionnels, est en premier lieu aléa-centrée, et découle directement des sciences de la terre et de l'ingénieur¹⁴³. Il s'agit de réduire l'exposition des populations au danger. La première stratégie est d'opérer sur l'aléa lui-même pour limiter l'ampleur de la catastrophe. Lorsque les gestionnaires de la crise

¹⁴² *Ibid.*

¹⁴³ BECERRA, S., PELTIER, A. (dirs.), *op. cit.*, p. 10

veulent ainsi atténuer, supprimer ou confiner l'aléa, on parle de prévention active¹⁴⁴, à l'instar du déroutement à la dynamite d'une coulée de lave de l'Etna le 11 mai 1983 ou du déversement de 4 millions de litres d'eau sur les coulées du Kirkjufell en Islande en 1973, afin d'en solidifier leur surface et donc de ralentir leur progression¹⁴⁵.

Aussi, l'idée d'insérer à l'intérieur du cratère du LUSI des boules de béton (avec des composants chimiques intégrés afin de ralentir leur dissolution) a-t-elle été tentée, au départ, pour ralentir les émissions éruptives. Il s'agissait de sphères de 20 et 40 cm de diamètre agglomérées par clusters de 4 unités. 398 clusters ont ainsi été introduits au total, certains ayant pu atteindre une profondeur de 1000 m¹⁴⁶. Cette volonté initiale de défense active a été peut-être ici renforcée par la préférence, au début de l'éruption, par les autorités, de la thèse du déclenchement accidentel, l'aléa n'étant donc pas considéré comme totalement naturel. Mais cette opération n'a pas été suivie d'une réduction des flux boueux et a donc été abandonnée.

La solution la plus efficace consiste en la construction de digues afin de circonscrire la boue. Cela donne lieu, par là-même, de délimiter le périmètre de la catastrophe. Cette résolution à contenir les flots de *mud breccia* et d'eau induit une volonté de matérialiser le désastre. C'est une façon de s'approprier la gestion de cette catastrophe qui s'étale aussi bien dans l'espace que dans le temps, en lui définissant des frontières concrètes (**figure 21**, *supra*). Elles ont sans cesse été reconstruites, rehaussées, ajoutées, reculées en périphérie, au gré de l'évolution des volumes de boue éjectés et s'accumulant. Les pressions exercées par la boue, ajoutées au phénomène de subsidence, au contexte sismique de la zone, et à l'apport de volumes d'eau météorique conséquents en saison des pluies, fragilisent ces digues qui se rompent parfois (**figure 22c**, *infra*). La subsidence des levées a pu être mesurée à un rythme atteignant jusqu'à 13 cm par mois¹⁴⁷. Ces digues s'organisent en un réseau à la fois interne (à l'intérieur de la zone inondée, au plus près du cratère, appelée digue annulaire, et de nos jours submergée, conduisant à l'ensevelissement irréversible des 3 villages Jatirejo, Renokenongo, Kedungbendo) et externe (sur les marges les plus périphériques de la zone boueuse, entretenues régulièrement actuellement). Les levées sont essentiellement en terre, parfois renforcée par des gabions de pierre disposés en étage (**figure 22 a et b**, *infra*). La question de la construction d'une digue de 10 mètres de large pour 50 mètres de

¹⁴⁴ DAUPHINE, A., PROVITOLLO, D., *op. cit.*, p. 290-293

¹⁴⁵ *Ibid.*, p. 339

¹⁴⁶ MAZZINI, A. *et al.*, *op. cit.* (2007), p. 387

¹⁴⁷ AGUSTAWIJAYA, D.S. *et al.*, « The Stability Analysis of the Lusi Mud Volcano Embankment Dams using FEM with a Special Reference to the Dam Point P10.D », *Civil Engineering Dimension*, vol. 14, n°2 (2012), p. 100-101



Figure 22 :

a. (En haut) Digue confortée par des gabions, à l'ouest de la zone ensevelie par la boue (prise de vue sens sud/nord) © Cahill Kece, 2013

Noter la voie ferrée et la route asphaltée, à gauche.

b. (Ci-contre) Levée en terre construite au sud-est du LUSI © Cahill Kece, 2013

Noter le conduit en bas à gauche de l'image servant à délester la boue vers la rivière Porong (prise de vue sens sud/nord).

c. (En bas) Rupture de la digue à l'est de l'éruption en avril 2011 (prise de vue par hélicoptère sens nord/sud) © S. Hadi, 2011

Les boues s'épanchent dans les rizières en contre-bas.





Figure 23 : Sortie du conduit évacuant une partie de la boue émise par le LUSI et se déversant dans la rivière Porong, au sud de la zone © Adang Awh, 2017

hauteur a pu être évoquée au départ¹⁴⁸, mais le gouvernement central a fait le choix de gérer cette aménagement défensif par des travaux réguliers, alimentés par des fonds publics. Le dernier exercice budgétaire du Ministère indonésien des Travaux publics et du Logement (PUPR) a ainsi débloqué la somme de 239,7 milliards de roupies (soit près de 14 millions d'euros), en 2020, afin d'entretenir les infrastructures de protection face aux épanchements de boue liés à l'éruption du LUSI¹⁴⁹. Cette enveloppe financière a donc permis de conforter les digues, et une extension se profile à l'est, vers Glagah Arum. La préservation de celles-ci passent également par le pompage des eaux météoriques en saison des pluies qui remplissent la zone circonscrite, afin d'en limiter la surcharge de pression créée sur les levées. Ce pompage permet cependant avant tout de contrôler l'écoulement de *mud breccia*, en partie dirigé par un système de canalisation vers la rivière Porong.

En effet, une autre solution de gestion de la catastrophe, mise en oeuvre par les autorités dès le 22 novembre 2006, consiste au déversement d'une fraction des boues dans la rivière voisine (**figure 23**, *supra*). Il s'agit là aussi d'un aménagement défensif actif. Déviées dans un bassin par un système de chenalisation des torrents descendant du cratère d'éruption du LUSI, en forme de fer à cheval (cf. carte de synthèse en **figure 24**), ces boues sont diluées à 80% par de l'eau avant d'être

¹⁴⁸ MAZZINI, A., *ibid.*

¹⁴⁹ Article de Caesar AKBAR, juin 2020. Dans : *journal tempo.co*, [en ligne], URL : <https://bisnis.tempo.co/read/1351020/lanjutkan-pengendalian-lumpur-sidoarjo-pupr-siapkan-rp-2397-m> (consulté en avril 2021)

dirigées vers une canalisation, en direction du cours d'eau. Ces boues ainsi drainées sont alors rejetées vers le détroit de Madura, à l'embouchure de Porong, 20 km à l'est. Des impacts sont relevés par les chercheurs en environnement. Si la sédimentation du lit de la rivière a légèrement augmenté jusqu'à son embouchure, notamment en saison sèche, cela ne semble pas modifier ses dynamiques érosives¹⁵⁰. Les coraux et les mangroves au débouché semblent tout de même affectés par ces dépôts¹⁵¹. Cet afflux boueux a cependant des effets notables concernant la qualité de l'eau, augmentant la turbidité, faisant diminuer le niveau d'oxygène, et donc entraînant une certaine eutrophisation de la rivière. La toxicité augmente également. Ces deux paramètres sont néfastes pour les populations aquatiques, en particulier celles de crevettes traditionnellement pêchées dans ce cours d'eau. Les revenus liés à cette activité ont ainsi diminué de 25% entre 2006 et 2008 dans les districts longeant la rivière Porong¹⁵².

La dangerosité sur la santé humaine est aussi avérée. Les métaux présents dans la boue du LUSI ne sont pas inquiétants en tant que tels, mais leur association à d'autres éléments les rendent parfois néfastes. Ainsi du mercure se déposant sur les sédiments de la rivière et que les bactéries que ceux-ci contiennent transforment en méthyle de mercure, toxique. De même pour l'arsenic, absorbé par les minéraux de fer présents dans la *mud breccia*, mais relâché dans le cours d'eau par dissolution¹⁵³. Cela est d'autant plus problématique que cette rivière est classée en niveau III dans la nomenclature indonésienne, ce qui signifie qu'elle est nécessaire à l'irrigation des champs et à l'apport en eau des troupeaux.

Ces enjeux environnementaux dépassent donc l'échelle du district du Sidoarjo, en se répandant au fil de la rivière Porong. L'aménagement de cette canalisation d'évacuation des boues du LUSI contribue ainsi à l'expansion spatiale de la catastrophe.

3. De la catastrophe au risque : un événement se réalisant puis s'anticipant et conduisant à de nouveaux dangers anthropisés

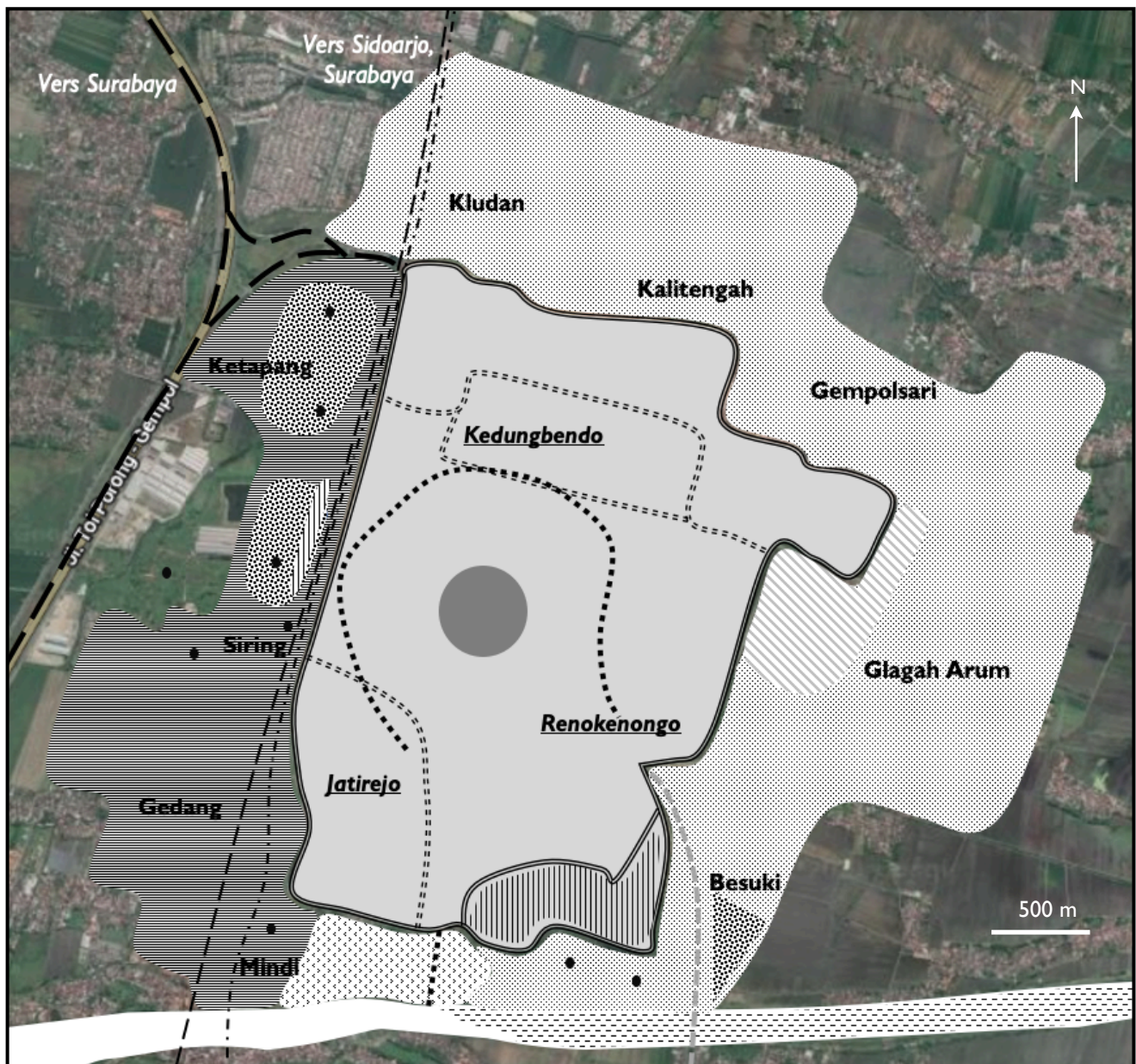
La **figure 24** ci-après tente de spatialiser la catastrophe de l'éruption du LUSI, en tenant compte de ses dynamiques temporelles. Nous choisissons de représenter l'extension actuelle de la couverture de la zone par la *mud breccia*, avec les différents enjeux affectés (infrastructures et

¹⁵⁰ KURE, S., et al., « Effects of mud flows from the LUSI mud volcano on the Porong River estuary, Indonesia », *Journal of Coastal Research*, Special Issue n°70 (2014), p. 571-572

¹⁵¹ BAGJA PRATAMA, B., et al., *op. cit.*

¹⁵² KURE, S., et al., *ibid.*

¹⁵³ KRISNAYANTI, B.D., AGUSTAWIJAYA, D.S., « Characteristics of Lusi mud volcano and its impacts on the Porong River », *Journal of degraded and mining lands management*, vol. I, n°4 (2014), p. 207-210



Légende

1. Les flots de boue et leur gestion : la matérialisation spatiale d'un aléa mouvant

a. Le cœur de la zone impactée

- Cratère du LUSI avec bassin géothermal
- Extension actuelle des zones couvertes par la mud breccia, asséchée ou fluide
- Jatirejo** Les 3 villages entièrement submergés
- Voie express à péage coupée par l'éruption

b. Des aménagements de protection active des enjeux qui évoluent

- Contenir la boue, confiner l'aléa pour réduire la vulnérabilité
 - Anciennes digues (internes) à présent submergées
 - ===== Dignes externes actuelles délimitant la catastrophe
 - ▨ Préparation de l'extension de la digue vers l'est
- Évacuer la mud breccia (et le surplus d'eau)
 - ▨ Bassin pour diluer la boue (ou évacuer l'eau)
 - ⋮ Canal d'évacuation construit dès novembre 2006
 - ⋮ Chenalisation à partir de 2017 des torrents boueux expulsés du cratère hydrothermal

2. L'expansion spatiale de la catastrophe dans le temps

a. Une propagation des aléas en-dehors de la zone endiguée

- Suintement gazeux (essentiellement CO₂)
- Axes de transport menacés (route asphaltée et voie ferrée, parallèles à la digue ouest)
- ▨ Rivière Porong encombrée et polluée par les boues

b. L'adaptation à la catastrophe et l'intégration des nouveaux risques : entre résilience territoriale et nouvelles vulnérabilités

- Entre abandon et reconstruction
 - ▨ La fuite : fort recul de l'urbanisation entre 2006 et 2021
 - Reconstruction de l'axe autoroutier, plus à l'ouest, avec connexion à la route asphaltée (Jalan Arteri Porong)
- Zonage des risques : vers une prise en compte des aléas à venir du LUSI en fonction de la vulnérabilité (densités, enjeux, rupture digues)
 - ▨ Risque fort
 - ▨ Risque modéré
 - ▨ Risque faible

Figure 24 :
Cartographie des impacts du LUSI : enjeux et gestion spatiale d'une catastrophe du temps long

Conception
Mathieu Huez

Sources principales
J. Ekawati et al., A. Farida, BPLS, articles de presse indonésiens

© GoogleEarth, 2021
(Photo satellite support)

activités), mais les aménagements défensifs sont symbolisés dans leur dimension évolutive, depuis 2006. Ces mesures de gestion de l'aléa boueux permettent de matérialiser l'emprise spatiale de la catastrophe, mais contribuent aussi à son expansion. L'étalement spatio-temporel du désastre se traduit également par le zonage du risque pour les zones limitrophes de la zone éruptive principale circonscrite, et menacées par divers aléas en lien avec le LUSI (principalement l'épanchement de boue, mais aussi les émanations de gaz et la subsidence des sols).

L'évolution des aménagements défensifs témoignent d'une volonté de s'adapter à cette catastrophe du temps long. La cartographie des zones menacées fait quant à elle émerger un paradoxe dans les temporalités de ce désastre : elle initie une prise en compte des risques liés aux aléas de l'éruption du LUSI dans un futur virtuel, alors même que ceux-ci sont déjà en cours de réalisation, dans le présent. L'éruption sédimentaire, par sa durée, n'est alors plus vue seulement comme une catastrophe à gérer dans l'urgence, mais aussi sous l'angle d'un risque potentiel à venir, en ciblant les espaces qui pourraient être impactés dans un futur plus ou moins proche. C'est cette imbrication des temps de la catastrophe qui complexifie la capacité des acteurs du territoire (les autorités et la population locale au premier chef) à faire face à la crise éruptive. Mise à part ce dispositif de prévention, d'autres formes de résilience sont par ailleurs observables, avec l'abandon des villages¹⁵⁴ les plus menacés, mais aussi la reconstruction, plus à l'ouest, de l'autoroute à péage détruite par le LUSI, axe majeur de communication de la région, le rétablissement des réseaux constituant une priorité en matière de réorganisation des territoires sinistrés par une catastrophe¹⁵⁵.

Mais les nouveaux périls sont aussi amplifiés de façon anthropique avec les dangers que représentent la pollution de la rivière et les ruptures potentielles des digues construites pour contenir les boues. Ces levées, qui servaient d'abord à circonscrire l'aléa, ont ensuite été destinées à protéger les enjeux alentours, avant de finalement représenter un nouveau risque. En voulant gérer activement l'aléa, les autorités semblent donc avoir augmenté la vulnérabilité du territoire autour du LUSI¹⁵⁶.

¹⁵⁴ Le concept de résilience d'une société tient compte de sa « capacité à faire face à la catastrophe (...) et à l'anticiper », in ANTOINE, J.M. (dir.) *et al.*, *op. cit.*, p. 96-97. L'évacuation temporaire face au danger, et son pendant, l'abandon de zones fortement menacées, font donc partie des formes de résilience d'un territoire.

¹⁵⁵ DAUPHINE, A., PROVITOLLO, D., *op. cit.*, p. 364

¹⁵⁶ « La résilience qui consiste à (...) augmenter les digues tend à rendre plus vulnérable le territoire » d'après PIGEON, P., « Le risque digue : pourquoi revenir sur la distinction risque naturel-risque technologique ? », in BERNIE-BOISSARD, C. (dir.), *L'aménagement du territoire à l'épreuve des risques*, PUAM, Aix-en-Provence (2012), p. 35

L'éruption du LUSI est donc une catastrophe qui s'inscrit dans l'espace-temps, avec une imbrication très forte de ces deux dimensions. Ainsi, les limites spatiales du désastre, marquées par les digues construites pour gérer l'aléa boueux, fluctuent depuis 2006, reculant ses marges externes, délimitant alors un périmètre mouvant qui s'adapte à l'évolution de l'éruption. L'évacuation des boues vers la rivière Porong élargit le territoire de la catastrophe, le prolongeant jusqu'à l'embouchure de celle-ci, 20 km en aval, par la pollution qui en découle. Les conséquences sur les enjeux à préserver sont avant tout locales, mais avec une extension des zones sinistrées dans le temps : évacuation des habitants au gré des émanations de gaz et des ruptures de digues, destruction des rizières et zones d'activités, des infrastructures, avec une cartographie du risque qui tente de définir les dangers à venir. Les répercussions sont aussi régionales, avec la coupure de l'autoroute permettant de relier le sud de la province de Java oriental au nord, qu'il a fallu reconstruire, et la menace actuelle d'une fermeture de la voie ferrée qui longe la digue ouest contenant les boues du LUSI. La morphologie spatiale du territoire du Sidoarjo est donc façonnée à la fois par la catastrophe et par l'anticipation des risques à venir liés à l'éruption.

Une forme de résilience se dessine, révélant les capacités d'adaptation de la société concernée à faire face à cette catastrophe du temps du long. Ainsi des aménagements défensifs constamment entretenus, ou encore de l'axe autoroutier majeur reconstruit plus à l'ouest, et connecté au réseau des villages limitrophes du LUSI, montrant que les habitants du secteur ne sont pas délaissés. Cela n'a toutefois pas empêché la fuite d'une partie d'entre eux des zones menacées par l'extension des aléas du LUSI (probablement encouragée, pour certains propriétaires d'habitats légaux, par les indemnisations qu'ils ont pu percevoir, cf. **Annexe 3**). La gestion aléa-centrée de la catastrophe glisse vers une prise en compte des risques potentiels liés à l'éruption, lesquels sont en partie anthropisés notamment par la construction des levées : leur rupture éventuelle constitue une nouvelle menace à intégrer dans le territoire qui paraît alors plus vulnérable.

Le chapitre suivant examinera davantage cette résilience sous l'angle de la capacité à surmonter cette crise¹⁵⁷, laquelle est cependant ici en cours de réalisation, par différents acteurs du territoire, à la fois de la sphère publique et de la société civile. Les intérêts des populations se confrontent souvent à la gestion par les autorités, induisant des interactions à différentes échelles spatiales entre les protagonistes. Le temps de la catastrophe elle-même n'est toujours pas défini, et s'inscrit dans la durée, ce qui impose à tous le défi complexe de s'adapter constamment à l'éruption.

¹⁵⁷ « L'aptitude d'un système complexe (une ville par exemple) à se rétablir et à améliorer sa réactivité », donc à s'adapter, est un « critère de résilience *après* une catastrophe », in VEYRET, Y. (dir.), et al., *op. cit.*, p. 30

CHAPITRE III - FAIRE FACE AU DÉSASTRE : LES RÉPONSES DES ACTEURS DANS LA DYNAMIQUE DE RÉSILIENCE DU TERRITOIRE

I. L'indemnisation de la catastrophe : les imbrications du jeu de responsabilités entre les pouvoirs publics et les intérêts de la société *Lapindo Brantas*

La compensation des dommages et la reconstruction d'une zone affectée par une catastrophe naturelle est, dans un contexte économique capitaliste dominant, forcément associée à une valeur monétaire. Cette dimension marchande accordée à chaque type de dégât recensé est donc une pratique courante dans la gestion d'une catastrophe et permet de mesurer le niveau de destruction matérielle dans un espace donné, mais exclut de fait le dédommagement des conséquences morales¹⁵⁸. Différents acteurs sont impliqués dans la prise en charge de l'indemnisation de la catastrophe. Concernant le cas du LUSI, dans un espace faiblement assuré au niveau individuel, cette responsabilité a été au départ rejetée entre le gouvernement indonésien et l'entreprise d'exploitation d'hydrocarbures *Lapindo Brantas (LB)*. Ce jeu au sein des organisateurs de la gestion de la catastrophe met en lumière les liens entre organisation politique du pays et milieu des affaires.

Le débat sur l'origine de l'éruption boueuse, portant sur son caractère accidentel ou naturel (cf. Partie II, chapitre I, *supra*), a conduit à une certaine confusion dans la prise en charge des conséquences socio-économiques de la catastrophe. La thèse d'une erreur humaine dans la gestion du puits BJPI contribuait, initialement, à dédouaner la responsabilité des autorités publiques, au détriment de la société privée *LB*. Aussi le gouvernement avait-il ordonné à cette compagnie de dédommager les victimes et de participer aux travaux visant à limiter les impacts de l'éruption et notamment à contenir les flots boueux. Dans sa mission d'intérêt général, l'État indonésien se devait toutefois de prendre en charge le rétablissement des infrastructures publiques¹⁵⁹, en actant plusieurs décrets présidentiels chargés de juguler le désastre.

C'est pour cela que le gouvernement indonésien a refusé de déclarer la catastrophe comme une « calamité nationale », statut qui aurait libéré la compagnie *LB* de ses responsabilités financières d'indemnisation en les reportant, de fait, sur les pouvoirs publics¹⁶⁰.

¹⁵⁸ PADAWANGI, R., in MILLER M.A., DOUGLASS, M. (ed.), *op. cit.*, p. 61-84

¹⁵⁹ MUHTADA, D., *op. cit.*, p. 186

¹⁶⁰ SCHILLER, J., et al., *op. cit.*, p. 57

Une première agence publique a été créée dès le début de la catastrophe afin de comprendre les mécanismes de celle-ci. Ainsi, le 14 juin 2006 est mise en place la *Lapindo Mud Investigation Team* (Groupement d'enquête sur les coulées de boue de Lapindo), dirigée par le géologue Rudi RUBIANDINI convaincu par la thèse accidentelle¹⁶¹. Outre l'ingérence de l'Etat indonésien dans le monde scientifique local (évoqué précédemment), cela révèle le souhait du gouvernement de se décharger de la responsabilité des conséquences de l'éruption, dans un premier temps. Cette ligne directrice est aussi marquée dans le nom retenu pour la catastrophe : « Lapindo mud », soit « lumpur Lapindo » en Indonésien, en lieu et place de « lumpur Sidoarjo » (LUSI). Cette appellation de « lumpur Lapindo » est localement, tant par les médias que par la population, préférée à celle internationalement retenue de LUSI¹⁶². Les flots de boue sont donc associés à la société exploitante d'hydrocarbures, et permet de ne pas corréler l'ensemble du district à la catastrophe, pour éviter de connoter négativement son image, avec les impacts en terme de diminution d'attrait économique et touristique de la zone que cela implique.

Mais dès septembre 2006, cette agence est dissoute et remplacée par un office public chargé de coordonner les opérations de secours et de préservation : la *National Sidoarjo Mudflow Mitigation Task Force* (Groupe de travail national sur l'atténuation des coulées de boue du Sidoarjo), elle-même remplacée le 8 avril de l'année suivante¹⁶³ par la *Sidoarjo Mudflow Mitigation Agency* (Agence de mitigation des boues du Sidoarjo), connue sous l'acronyme indonésien BPLS¹⁶⁴. Cette dernière a offert la couverture la plus complète de la crise sous supervision des pouvoirs publics, avec des employés assignés à temps plein et une mission de reconstruction, en plus de la gestion de l'atténuation de l'aléa boueux. Elle est restée effective jusqu'à sa suppression le 2 mars 2017, sur décision présidentielle¹⁶⁵. Ses prérogatives ont été dès lors transférées au Ministère des Travaux Publics, notamment concernant les mesures en matière de régulation des flots de boue et de protection des populations et des infrastructures, renforçant la centralisation de la gestion de la catastrophe. Le décret stipule dans le même temps la continuité des indemnisations par la société *Lapindo Brantas* suivant les modalités arrêtées en 2007.

Quelles sont les indemnisations dont a été redevable cette compagnie ? Il convient ici d'indiquer la méthode de zonage des populations à indemniser. Elle s'appuie sur une démarche

¹⁶¹ *Ibid.*, p. 65

¹⁶² *Ibid.*, p. 56

¹⁶³ par le décret présidentiel n° 14 de l'année 2007, in MUHTADA, D., *op. cit.*, p. 187

¹⁶⁴ BPLS : Badan Penanggulangan Lumpur Sidoarjo

¹⁶⁵ Décret présidentiel n°21 de l'année 2017, transmis au secrétariat du Cabinet de la République d'Indonésie, [en ligne], URL : <https://setkab.go.id/en/president-jokowi-dissolves-sidoarjo-mudflow-mitigation-agency/> (consulté en avril 2021)

classique dans la gestion des aspects humains des risques, qui consiste à coupler des données qualitatives et quantitatives¹⁶⁶. Les autorités indonésiennes ont ainsi retenu les critères d'atteinte aux biens matériels des villageois et à leurs conditions de vie (maisons inondées ou soumises aux émanations de gaz, canaux d'irrigation bouchés, eau devenue impropre à la consommation,...) en fonction de l'exposition plus ou moins directe aux aléas du LUSI¹⁶⁷, afin d'établir une cartographie des secteurs à dédommager. Ces critères se sont calqués sur les conditions qu'avaient adoptées la société LB¹⁶⁸. Ce zonage (visible en **Annexe 3**) a évolué dans le temps, au gré de l'étalement spatio-temporel des conséquences de l'éruption. Les montants des sommes allouées ont alors été fixées par décret présidentiel¹⁶⁹ :

- des indemnités de relogement de 5,5 millions de roupies indonésiennes (environ 300 euros) par famille et 300 000 IDR par personne et par mois (soit une quinzaine d'euros).
- Des compensations pour les pertes subies en fonction du type d'occupation du sol, de 120 000 IDR (~7 euros) par m² de rizière à 1,5 million de roupies (~ 85 euros) par m² de bâtiment d'habitation. Encore faut-il que les habitants puissent justifier de leur propriété des terres.

Notons que si les paiements des dégâts subis par les habitants dans les zones affectées de 2006 à 2007 sont sous la responsabilité de la société *Lapindo Brantas*, ceux à partir de 2008 dépendent de l'Etat. La part publique dans les indemnisations n'a, dès lors, cessé de croître.

La question des liens entre le gouvernement indonésien et la compagnie pétrolière doit ici être posée. En effet, le processus d'enquête officielle menée afin de déterminer l'origine de la catastrophe n'a abouti qu'en 2009, avec la reconnaissance au mois d'août, par les autorités, de l'éruption comme étant naturelle, et donc de la responsabilité de l'Etat dans le dédommagement des conséquences de celle-ci. Cela a été entériné le mois suivant par la Chambre des Représentants¹⁷⁰. Or, les décrets présidentiels avaient, dès avant cette conclusion, engagé un tournant avec la participation croissante aux indemnisations, depuis un décret d'avril 2007¹⁷¹. Cela interroge la collaboration qui pourrait sous-tendre entre les pouvoirs publics et *Lapindo Brantas*. Il s'avère en effet que la famille Bakrie, possédant le conglomerat Bakrie Group auquel appartient LB, est liée notamment au président alors en fonction, Susilo Bambang Yudhoyono (de 2004 à 2014).

¹⁶⁶ NOVEMBER, V., *op. cit.*, p. 158

¹⁶⁷ PADAWANGI, R., *op. cit.*, p. 67-68

¹⁶⁸ DRAKE, P., « Under the mud volcano : Indonesia's mudflow victims and the politics of testimony », *Indonesia and the Malay World*, vol. 41, n° 121 (2013), p. 306

¹⁶⁹ BOSNAK, J.E., *op. cit.*, p. 461-462

¹⁷⁰ *Ibid.*, p. 464-465

¹⁷¹ SCHILLER, J., et al., *op. cit.*, p. 63

L'ancien dirigeant du groupe, Aburizal Bakrie, a ainsi été chef du Golkar, parti allié à cette présidence démocrate et pour laquelle il a servi¹⁷². Il semble donc y avoir collusion d'intérêts entre le monde des affaires pétrolières et le domaine politique. Et ceci explique probablement l'exonération de toute responsabilité pour *LB* dans les enquêtes menées tant au niveau local que parlementaire, en passant par la Cour Suprême, laquelle a débouté une association d'écologistes ayant porté plainte contre la compagnie, affirmant qu'il n'y avait pas de lien tangible entre l'éruption et quelque défaillance de *Lapindo Brantas*¹⁷³. Et, dans le même temps, *LB* arguait de son rôle de contributeur aux indemnisations, se posant en généreux mécène de la reconstruction face à un désastre naturel, dans le but politique de soigner son image auprès de la population, électeurs potentiels¹⁷⁴.

Ces tergiversations dans la désignation des responsabilités ont contribué à ralentir le rythme des indemnisations. Même si le président Yudhoyono avait déclaré plusieurs fois en 2007 que la société pétrolière devait l'équivalent de 400 millions d'euros¹⁷⁵ aux victimes du LUSI et en participation à l'effort de protection contre la boue, la population n'a vu arriver que lentement les aides promises, laissant un sentiment d'abandon. Ce jeu de rejet des responsabilités visait aussi sans doute en partie à dédouaner le gouvernement de sa pleine obligation à gérer la catastrophe aux yeux des habitants. Ce pari a vraisemblablement été remporté au moins dans le vocable employé pour désigner le désastre : l'appellation LUSI, rappelons-le, n'est pas utilisée localement, au profit de celle de « lumpur Lapindo »¹⁷⁶. Pour la population, l'éruption est donc associée à l'entreprise pétrolière.

2. La perception de la catastrophe par la population et le statut de victime

La population se sent oubliée et perdue dans le jeu de renvoi des responsabilités. L'absence de réponse précise quant à l'origine de la catastrophe et à sa prévision de durée participe à ce sentiment de désarroi. Tout cela pousse à la méfiance vis-à-vis tant des autorités que de la société *LB*. Mais de nombreux éléments sont à prendre en considération dans la façon dont les habitants affectés par l'éruption appréhendent et conçoivent cet événement qu'ils subissent.

¹⁷² DRAKE, P., « Multiple visions of Indonesia's mud volcano : understanding representations of disaster across discursive settings », *Disasters*, n°40 (2016), p. 348

¹⁷³ *Ibid.*

¹⁷⁴ BOSNAK, J.E., *op. cit.*, p. 459

¹⁷⁵ SCHILLER, J., *et al.*, *op. cit.*, p. 62

¹⁷⁶ BOSNAK, J.E., *op. cit.*, p. 458-459

Tableau 5 : Les facteurs augmentant ou diminuant la perception d'une catastrophe : quels sont leurs degrés d'influence pour les victimes du désastre du LUSI ?

Les cases des modalités qui sont estimées correspondre le plus aux habitants affectés par l'éruption apparaissent en grisé

Facteurs d'influence	Modalité augmentant la perception	Modalité diminuant la perception	Eléments de compréhension de l'influence de ces facteurs dans le cas des victimes du LUSI
Les références personnelles			
Familiarité	Non familier	Familier	Les habitants ont été surpris par l'éruption. Pas de cas récemment documenté.
Contrôle personnel	Incontrôlable	Contrôlable	Rien ne peut être fait par les habitants pour préserver leurs biens (habitations, terres cultivées) face aux flots boueux ou aux émanations de gaz.
Compréhension	Incompréhensible	Compréhensible	Le relativement faible niveau d'instruction couplé à l'incertitude scientifique donnent une mauvaise compréhension de la catastrophe et aboutissent même à des arguments se référant à un complot.
Les caractéristiques des effets			
Potentiel catastrophique	Concentration dans le temps et l'espace des dommages	Dispersion spatio-temporelle des dommages	C'est un désastre du temps long.
Date des effets	Effets dilués	Effets immédiats	Les conséquences des dommages sont étalés dans le temps, sans perspective de fixer une durée.
Effets sur les générations futures	Effets prévus	Effets non prévus	Les effets à long terme de la catastrophe ne sont pas encore connus, même si l'on anticipe une subsidence du secteur et un écoulement des boues pendant plusieurs décennies <i>a minima</i> .
Réversibilité	Impacts irréversibles	Impacts équitables	Les impacts sur le territoire semblent toutefois irréversibles, les villages ensevelis sous les boues sont contraints à l'abandon.
La capacité de gestion			
Incertitude	Incertitude scientifique	Certitude scientifique	Les scientifiques ne sont pas d'accord quant à l'origine de la catastrophe ni à sa durée.
Effort des institutions	Institutions absentes	Institutions engagées	Les autorités sont présentes mais leur lenteur est critiquée, notamment sur la question de l'indemnisation. La gestion paraît trop centralisée, et non au plus près des habitants (« décrets présidentiels »), lesquels ont voulu faire valoir leurs droits en se déplaçant jusqu'à Jakarta. Sentiment parfois d'abandon et d'injustice.
Médiatisation	Forte	Faible	Les actualités locales et nationales ont couvert l'événement. Un <i>soap opera</i> télévisé a été réalisé sur la catastrophe (<i>Dig a hole, fill a hole</i>). Faible couverture internationale cependant.

Conception : Mathieu Huyez (d'après les données conceptuelles d'André Dauphiné et Damien Provitalo)

Dans les facteurs influençant l'augmentation ou la diminution de la perception des catastrophes, A. DAUPHINE et D. PROVITOLO distinguent trois groupes : les références personnelles, les caractéristiques des effets, la capacité de gestion¹⁷⁷. A partir des recherches de ces auteurs, nous proposons de synthétiser la perception de la catastrophe du LUSI par les habitants dans le **tableau 5** ci-avant. Cela permet de donner une idée de la façon dont ils se représentent le désastre, et leur place au sein de celui-ci en tant que victime. Soulignons qu'il s'agit ici d'une estimation globale de la perception des habitants par facteur, ce qui ne permet pas de rendre compte de la diversité des situations individuelles, laquelle nécessiterait une analyse plus fine par des enquêtes locales par exemple.

Ce tableau révèle ainsi que la plupart des facteurs d'influence tendent à favoriser l'augmentation de la perception de la catastrophe du LUSI par la population. La méconnaissance de l'aléa en amont du désastre est renforcée par l'incertitude scientifique, ce qui induit un argumentaire alimentant le statut de victime injuste, du complot à l'abandon par les autorités gestionnaires.

En effet, le choix d'endiguer la zone centrale de l'éruption ayant conduit *de facto* à l'enfouissement sous la boue des 3 villages les plus proches du LUSI est parfois perçu comme un sacrifice au profit d'intérêts économiques. Ainsi des mémoires de H.M. Maksun Zuber, victime de l'engloutissement de Jatirejo, qui mettent en lumière le regret de la destruction de son village, en posant la question suivante : « A-t-il coulé de lui-même ou a-t-il été sacrifié à des fins économiques? »¹⁷⁸. Jatirejo a été inondé par les boues suite à une rupture dans une levée, deux mois après le début de l'éruption. Pour cet auteur, les digues auraient pu être maintenues autour du village pour le sauver, et il pointe ainsi la responsabilité de l'entreprise de faire déplacer intentionnellement les habitants dans le but de développer les activités de forage. S'il y a une zone de gaz à exploiter dans le sous-sol de la région, cela peut être une raison de forcer l'éviction des habitants. Le titre de l'ouvrage, écrit en 2009, est alors révélateur de cette association que fait l'auteur : *Titanic made by Lapindo*. C'est le point de vue des deux principales associations de victimes qui se sont constituées suite à l'éruption du LUSI : *Pagar Rekontrak* (Association des habitants de Renokenongo) et *Korban Lapindo Menguggat* (les Victimes de Lapindo Unifiées)¹⁷⁹.

¹⁷⁷ DAUPHINE, A., PROVITOLO, D., *op. cit.*, p. 134

¹⁷⁸ « Did it sink on its own or was it sacrificed for economic gain? Either way, the villagers believe that the ultimate goal was to remove the people from their village. Considering the actual conditions in the field, the levees should have been made to surround all of Jatirejo permanently. But ultimately it seems that the decision to sink the village was made » in DRAKE, P., *op. cit.* (2013), p. 304

¹⁷⁹ PADAWANGI, R., *op. cit.*, p. 73

Pourtant, l'arrêt des opérations d'exploitation d'hydrocarbures dans la zone affectée et l'intérêt que la famille propriétaire de la compagnie a de conserver une image publique soignée, en raison de son engagement en politique, ne peut plaider en faveur d'une inondation volontairement dirigée contre ces villages.

D'autre part, dans le traitement médiatique, à destination du grand public, l'argument fataliste a été parfois mis en avant. Ainsi de certains personnages du *soap opera* « *Dig a hole, fill a hole* »¹⁸⁰, diffusé nationalement dès 2006 par la chaîne JTV, qui évoquent au gré des épisodes le rôle de l'intervention divine dans le déclenchement de la catastrophe. Ce fatalisme est à mettre en relation avec les financements à hauteur de 2,6 milliards IDR (soit 150 000 euros environ) perçus par ce média de la part de LB. L'argument divin, qui rencontre un écho résonnant dans une société fortement empreinte religieusement (par l'islam), conforte la thèse naturelle en rejetant par conséquent celle accidentelle¹⁸¹ : cela innocente de fait la compagnie pétrolière. Notons ici que la médiatisation de la catastrophe s'est davantage cantonnée aux échelons locaux et nationaux. Le niveau international semble plus marginal contrairement à la plupart des désastres précédents ayant ravagé l'Indonésie (séisme et tsunami du 26 décembre 2004 ayant dévasté la province de Banda Aceh par exemple, un an et demi avant l'éruption du LUSI).

C'est d'ailleurs la faible ampleur spatiale de la catastrophe qui pousse certains habitants affectés, se sentant abandonnés, à rechercher le soutien national, en particulier celui des autorités, dans la prise en compte de leurs difficultés. Cela se fait par un rapport d'opposition, à l'image des banderoles affichées surtout au début de la catastrophe au-dessus des rues embourbées (**figure 25**), afin d'en appeler à la responsabilité tant des dirigeants que de la compagnie LB. Cette double imputabilité est d'ailleurs souvent assimilée dans la perception des habitants. Ainsi, lors d'actions plus violentes, des ouvriers¹⁸² ayant perdu leur emploi suite à la destruction de leur usine ont forcé la grille d'entrée du bâtiment abritant les services administratifs de la préfecture du Sidoarjo en août 2006, pour réclamer l'intégralité de l'aide mensuelle promise par la société *Lapindo Brantas*¹⁸³. Cette contestation trouve son expression la plus visible nationalement lorsqu'un groupe de victimes décide de se rendre en avril 2007 à Jakarta pour protester devant le Palais Présidentiel (**figure 26**) et le bureau d'Aburizal Bakrie : les 2 types de responsables sont visés par les manifestants qui se sont enchaînés avec des cordes devant le premier et ont lancé des balles faites

¹⁸⁰ *Gali lubang, tutup lubang*, en Indonésien

¹⁸¹ BOSNAK, J.E., *op. cit.*, p. 468-481

¹⁸² Une dizaine d'industries employaient 539 ouvriers à Siring et 206 à Renokenongo avant la catastrophe.

¹⁸³ SCHILLER, J., et al., *op. cit.*, p. 73



Figure 25 : Banderole affichée dans le village de Siring partiellement inondé après une rupture de digue en novembre 2006 © Janda Aredo

Message littéral sur la banderole : « Jangan coba-coba ! Ingkar janji !! / Dengan warga korban luapan lumpur panas / warga siap menghadapi apapun / yang akan terjadi !! »

Traduction : « Ils n'ont même pas essayé ! Promesse non tenue avec les victimes des flots boueux !! Les citoyens sont prêts à aller jusqu'au bout !! »



Figure 26 : Manifestants s'enchaînant devant le palais présidentiel avec des cordes, en avril 2007

© Rita Padawangi, 2007

Figure 27 : Enfants bénéficiant d'une salle de classe dans le marché couvert de Porong

© Dani Muhtada, 2007



de la boue du LUSI sur le second¹⁸⁴. L'absence d'entrevue avec les gestionnaires nationaux de la catastrophe et l'indifférence des habitants de la capitale ressentie par les protestataires ont laissé un sentiment d'abandon accru. D'aucuns, parmi les victimes, ont perçu ce manque d'intérêt envers leur sort comme « *cruel* »¹⁸⁵. Ce manque de considération ressenti par les habitants sinistrés de la part des autorités culmine lorsque ceux-ci vivent en proche limite des zones indemnisées, à l'image d'un villageois de Besuki, interrogé par Philippe DRAKE, qui habite à 50 mètres d'une zone ainsi délimitée, et ne bénéficie alors pas des aides¹⁸⁶. Les manifestations de défiance vis-à-vis des gestionnaires du désastre se poursuivent dans le temps, mais leur répression a poussé peu à peu celles-ci à se cantonner spatialement au niveau des digues¹⁸⁷.

L'ensemble des incertitudes, au sujet de l'origine de la catastrophe, de sa durée, de l'indemnisation (rappelons ici que les habitants devaient prouver leur titre de propriété afin de jouir de celle-ci) conduit les populations directement impactées à se sentir comme des victimes différentes, à part. Le rapport de l'agence BPLS, en charge de la gestion déconcentrée de la catastrophe dans le territoire du Sidoarjo, notait en 2010 la place singulière que s'attribuait les sinistrés du LUSI, lesquels se considéraient même comme ayant plus souffert que les victimes des séismes et tsunamis précédents¹⁸⁸. Couplées au sentiment d'absence de reconnaissance de la part des autorités, ces incertitudes ont formé une sorte de méfiance vis-à-vis des personnes extérieures se rendant dans la zone de l'éruption, y compris de celles venant aider. Ainsi des dons des ONG provenant des surplus générés lors des opérations de solidarité internationales, engagées notamment suite au raz-de-marée de 2004 sus-évoqué, qui avait gravement affecté le nord-ouest de Sumatra. Les aides sont ainsi parfois perçues comme une forme d'achat du silence des villageois¹⁸⁹. Les compensations matérielles ne permettent pas, par ailleurs, de remplacer des pertes difficilement quantifiables comme les aspects communautaires, culturels et identitaires, la

¹⁸⁴ PADAWANGI, R., *op. cit.*, p. 74

¹⁸⁵ DRAKE, P., *op. cit.* (2013), p. 312-313

¹⁸⁶ *Ibid.*, p. 308

¹⁸⁷ Des gaz lacrymogènes sont utilisés à l'encontre des protestataires massés devant les bureaux de la préfecture du Sidoarjo en 2012. Depuis, la plupart des manifestations se déroulent sur les digues, in FARIDA, A., « Reconstructing Social Identity for Sustainable Future of Lumpur Lapindo Victims », *Procedia Environmental Sciences*, n°20 (2014) p. 470-471

¹⁸⁸ DRAKE, P., *op. cit.* (2016), p. 358

¹⁸⁹ DRAKE, P., *op. cit.* (2013), p. 305

dégradation du lien social¹⁹⁰, qui disparaissent avec l'ensevelissement des villages dans la boue ou avec le déracinement induit par le relogement loin de leurs terres d'origine¹⁹¹.

Cette perception augmentée de la catastrophe, influencée par les différents facteurs mentionnés, révèle le sentiment d'injustice qu'éprouvent les habitants du Sidoarjo face à une catastrophe qui ne leur paraît pas naturelle. Toutefois, les habitants ne remettent pas en question l'organisation politique du pays, malgré leur manque de confiance dans les gestionnaires officiels de la crise. Ils souhaitent simplement des mesures autorisant le retour à une vie normale. La population entreprend des efforts afin de gérer les impacts de l'éruption, en s'adaptant à ceux-ci, et même en se les appropriant.

3. La place de la population dans la gestion des conséquences de l'événement éruptif : capacités d'adaptation et formes de résilience

Faire face à la catastrophe, dans un processus de résilience, c'est d'abord s'adapter¹⁹² à la situation nouvelle qui s'impose. Dans la gestion des sinistrés, le retour à un fonctionnement sociétal satisfaisant fait partie de ce « retour à la normale ». Ce dernier n'est pas, nonobstant, forcément celui de l'état initial d'avant la catastrophe, des réorganisations et bifurcations dans les trajectoires territoriales faisant suite à la réaction au choc¹⁹³. Pour le LUSI, cela passe par le relogement des villageois, d'abord dans l'urgence, dans le marché de Porong. C'est là que les structures, certes sommaires, mais essentielles à la reprise de la vie quotidienne, sont recréées, à l'instar de l'accès aux sanitaires, ou encore à l'éducation, avec des salles de classe qui rouvrent (**figure 27**, *supra*). 7 ans après le début de la catastrophe, la moitié des réfugiés étaient encore présents dans ce centre d'hébergement d'urgence¹⁹⁴.

Des questions se posent dans ce type de concentration de réfugiés. La promiscuité permet-elle de retrouver les structures villageoises détruites par les coulées de boue ? De nouvelles formes d'organisation émergent-elles ? Cette concentration des sinistrés favorise-t-elle le sentiment de communauté parmi les victimes ou, au contraire, contribue-t-elle à leur division ? Philippe DRAKE constate un effet de groupe qui n'empêche cependant pas des courants différents,

¹⁹⁰ GILBERT, C., « La vulnérabilité : une notion vulnérable ? » in BECERRA, S., PELTIER, A. (dirs.), *op. cit.*, p. 31-32

¹⁹¹ La moitié des habitants de Renonkenongo, par exemple, ont été déplacés vers le village de Kedungkampil, à 70 km au nord-ouest de leur village d'origine, in FARIDA, A., *Ibid.*

¹⁹² DAUPHINE, A., PROVITOLO, D., *op. cit.*, p. 32

¹⁹³ RIGAUD, E., « La dialogique résilience-vulnérabilité » in BECERRA, S., PELTIER, A. (dirs.), *op. cit.*, p. 70-71

¹⁹⁴ FARIDA, A., *Ibid.*

des plus « transgressifs » souhaitant par exemple la destruction des levées de terre qui ont enseveli leurs villages, au plus « contenus », majoritaires, préférant le dialogue avec les autorités¹⁹⁵. D'autre part, l'éclatement géographique de la réinstallation des réfugiés dans les villages de la province de Java oriental, parfois à plusieurs dizaines de kilomètres de leurs lieux d'habitation originels, à l'instar des habitants de Renonkenongo sus-mentionnés, interroge quant à la pérennisation des mouvements de protestation.

Cette adaptation passe aussi par la réorganisation économique du territoire affecté par les flots boueux. L'exemple des producteurs de crevette est révélateur. Les rejets de boue dans la rivière Porong entraîne, par effet domino, une pollution des eaux jusqu'à l'embouchure (cf. Partie 2 Ch. 2 *supra*). Cela a pour conséquence une baisse notable des populations de crevettes d'eau douce et, de fait, de la production qui a accusé une chute de près de 26% entre 2007 et 2008 (passant de 7 338,5 à 5 467,2 tonnes)¹⁹⁶. L'impact est d'autant plus dommageable pour l'économie indonésienne que 5 672 ha de bassins de production pesant pour 10% du total des exportations nationales de pêche, et générant des milliers d'emplois, ont été affectés directement par les boues. Si certains éleveurs ont fermé leur entreprise piscicole, réclamant les aides ou se reconvertissant, d'autres se sont réorientés vers des espèces de poissons plus résistantes. La dernière réponse s'est traduite par un maintien de la production de crevettes, mais en réinventant les pratiques : introduction d'une technique de filtrage de l'eau, d'une nouvelle méthode d'alimentation des crustacés,...¹⁹⁷. Cela consiste par exemple à surveiller la qualité de l'eau dans les bassins d'élevage, et à maintenir leur oxygénation par une pompe. Cependant, seule une centaine de pénéiculteurs ont su adopter ce mode de production, notamment aidé par un réseau associatif japonais (Alter Trade Japan)¹⁹⁸.

La résilience économique se traduit également par une appropriation de la catastrophe elle-même. Aussi, la boue éructée devient-elle matière première dans la fabrication de ciment. Les composants chimiques des argiles du LUSI (riches en silicium, aluminium et fer) sont en effet reconnus pour leurs vertus résistantes, nécessaires à ce matériau liant¹⁹⁹. Certains villageois victimes du LUSI ont alors pu se lancer dans cette production de sable formé à partir des boues

¹⁹⁵ DRAKE, P., *op. cit.* (2013), p. 306-311

¹⁹⁶ FITRIANTO, A.R., « Shrimp Farmer's Innovation in coping with disaster (a case study in Sidoarjo Mud Volcano disaster toward shrimp farmers' responses) », *Procedia Economics and Finance*, n°4 (2012), p. 171

¹⁹⁷ KURE, S. *et al.*, *op. cit.*, p. 572

¹⁹⁸ FITRIANTO, A.R., *op. cit.*, p. 172

¹⁹⁹ NURUDDIN, M.F., *et al.*, « Sidoarjo mud: creating worth from waste », *WIT Transactions on Ecology and The Environment*, vol. 192 (2015), p. 309-315



Figure 28 : Mise en tourisme du LUSI

a. *En haut* : Touristes parcourant une zone de boue asséchée sur le LUSI, en 2020.

b. *Ci-contre* : Panneau dans le village de Siring proposant la « visite touristique des boues » du LUSI, depuis le parking, au tarif de 10 000 IRD / personne (environ 50 cents d'euro) en mobylette et 25 000 IRD en bus (soit 1,5 euro).

© nicodaniar, 2020



Figure 29 : *Survivant*, oeuvre de l'artiste Dadang Christanto réalisée en 2014 pour la commémoration du 8^{ème} anniversaire du début de l'éruption du LUSI

© Adi Channel, 2020 (captures d'écran d'un documentaire rétrospectif)

En cartouche : Stèle érigée à la mémoire de la catastrophe. «Monument pour la tragédie des boues de Lapindo - La boue de Lapindo a enterré notre village. Lapindo ne vend que de fausses promesses. Le pays a négligé de restaurer nos vies. Notre voix ne s'éteindra pas afin que l'on ne nous oublie pas - 29 mai 2014»

sédimentaires. Ainsi de M. Suratno, sinistré et ouvrier dans le bâtiment, qui a pu créer sa petite entreprise de traitement des boues du *mud volcano* afin de les convertir en ciment²⁰⁰.

Un autre mode d'absorption de la catastrophe, dans le processus de résilience, consiste ici en une mise en tourisme du phénomène. L'épanchement boueux et les éruptions régulières du LUSI attirent en effet des curieux, déambulant sur les zones asséchées (**figure 28a**). Cela n'est pas un phénomène propre à la région, puisque les *mud volcanoes* d'Azerbaïdjan, par exemple, ont été transformés en matière touristique, à l'instar du Dashgil dans le secteur du Gobustan, pour lesquels des circuits pour visiteurs ont été mis en place et vantés par les agences azéries²⁰¹. Il n'en demeure pas moins que cette forme d'appropriation pose question pour le LUSI, dans la mesure où les flots boueux sont associés à une catastrophe locale. C'est la population sinistrée qui organise elle-même les visites guidées, en proposant des tours à pied, en mobylette ou en bus (**figure 28b**). A cela s'ajoute sur les digues des vendeurs de souvenirs et autres DVD documentant l'éruption. Deux interrogations émergent alors de cette touristification du désastre :

— D'une part, cette mise en tourisme a été orchestrée par le gouvernement indonésien, dès 2010, par le truchement de l'agence publique BPLS chargée, rappelons-le, de gérer les conséquences du LUSI à l'échelon local du district concerné. Prétextant le « tourisme géologique »²⁰², ce glissement de la catastrophe vers le spectacle met en lumière une forme de gestion contradictoire et qui paraît calculée : les sinistrés peuvent-ils encore se poser en victimes alors qu'ils profitent de retombées économiques liées à l'exploitation de la catastrophe ?

— D'autre part, les emplois qui sont liés à cette forme d'appropriation du désastre sont souvent informels²⁰³. Les conducteurs des moto-taxis et autres éclaireurs de parking ne travaillent donc pas de façon légale, et se retrouvent sans assurance de stabilité sociale. Cette résilience économique semble alors placer les habitants bénéficiant de ces petits métiers dans une nouvelle forme de vulnérabilité, les mettant face à un risque d'insécurité sociale accrue.

Les populations victimes du LUSI ne sont toutefois pas dupes. En effet, pour effectuer ces emplois informels, elles occupent souvent, et paradoxalement, les mêmes huttes en bambou qu'elles ont érigées afin de rappeler aux gestionnaires leurs attentes en terme de reconnaissance

²⁰⁰ Interrogé par la chaîne Kompas TV le 30 mai 2016. Dans : *Cerita Kesuksesan Korban Semburan Lapindo (Histoires de réussite des sinistrés des boues de Lapindo)*, [en ligne], URL : <https://www.youtube.com/watch?v=QujQYFLtnjc> (consulté en mai 2021)

²⁰¹ Par exemple, voir « Top 5 treatment destinations in Azerbaijan ». Dans : *Travel in Baku*, [en ligne], URL : <https://travelinbaku.com/en/blog-detailed/101> (consulté en mai 2021)

²⁰² PADAWANGI, R., *op. cit.*, p. 72

²⁰³ FARIDA, A., *op. cit.*, p. 471

et d'indemnisation. La réclamation à plus de justice vis-à-vis de leur situation ne semble pas faiblir avec le temps. Aussi, le 29 mai 2014, à l'occasion du 8^{ème} anniversaire du début du désastre, les habitants avaient-ils, par exemple, érigé une stèle (**figure 29**) sur l'une des digues et sur laquelle est inscrite la phrase : « *La boue de Lapindo a enterré notre village. Lapindo ne vend que de fausses promesses. Le pays a négligé de restaurer nos vies. Notre voix ne s'éteindra pas afin que l'on ne nous oublie pas* ». Ce monument, qui en appelle à la responsabilité tant de la compagnie pétrolière que des autorités publiques (« le pays »), se veut mémoriel. L'objectif est de ne pas laisser s'effacer la mémoire de la catastrophe et des traumatismes qui l'ont accompagnée, en termes de pertes matérielles (maisons, emplois, lieux de culte...) et immatérielles (disparition de la vie villageoise, des terres des ancêtres,...). La catastrophe du LUSI, gérée par des digues visant à contenir les boues, a, de fait, condamné à l'engloutissement et donc à l'abandon irrémédiable (sus-évoqué) de 3 villages en totalité. De même, les visions d'artistes telle la sculpture éphémère *Survivant*, de Dadang Christanto (**figure 29**), réalisée en 2014, qui représente les sinistrés et victimes du désastre s'enfonçant peu à peu dans la boue, participent, en signifiant ainsi la crainte de l'oubli, à cette dynamique mémorielle. Les villages ont disparu, dans une logique d'abandon²⁰⁴ face à l'avancée des boues, mais le site est donc tout de même approprié par une certaine volonté d'entretenir la mémoire de la catastrophe.

Cela s'inscrit-il dans l'émergence d'une forme de culture du risque lié au volcanisme de boue dans la région ? L'éruption du LUSI n'avait pas été prévue, mais elle n'est peut-être pas inédite. Il semble en effet que des catastrophes similaires par le passé aient été oubliées. D'aucuns ont évoqué lors d'un congrès sur le LUSI qu'il y aurait eu un phénomène similaire dans les années 1920, à Java²⁰⁵. Des *mud volcanoes* fossiles et enfouis dans le sol ont été identifiés dans cette zone, notamment une structure qui s'est effondrée progressivement après la fin de son alimentation, dans le secteur de Porong, appréhendée par l'équipe du chercheur B. ISTADI²⁰⁶. Plus encore, dans cette région orientale javanaise, la disparition des royaumes Jenggala au XIII^e s. puis Majapahit au XVI^e siècle de notre ère aurait été en partie précipitée, selon certaines hypothèses, par l'occurrence d'éruptions de volcans de boue²⁰⁷. Cet aléa matérialisé par le LUSI n'est donc probablement pas nouveau pour la région, reste cependant à relier ces cas historiques à des SHHS.

²⁰⁴ DAUPHINE, A., PROVITOLO, D., *op. cit.*, p. 362

²⁰⁵ D'après les propos recueillis lors de l'entretien avec F. ODONNE (**Annexe I**).

²⁰⁶ MAZZINI, A., *et al.*, « Strike-slip faulting as a trigger mechanism for overpressure release through piercing structures. Implications for the Lusi mud volcano, Indonesia », *Marine and Petroleum Geology*, n°26 (2009), p. 1755

²⁰⁷ EKAWATI, E., *et al.*, *op. cit.*, p. 1

CONCLUSION DE LA DEUXIÈME PARTIE

Résilience systémique : panarchie et « vulnérabilité résilience » dans le territoire faisant face à l'éruption du LUSI

Les conséquences dommageables de l'éruption du *Lumpur Sidoarjo* s'inscrivent durablement dans le territoire. La gestion aléa-centrée, par protection active, a permis de circonscrire l'épanchement des flots de *mud breccia* avec la mise en place et l'entretien régulier de digues, au détriment de l'ensevelissement irréversible de 3 villages : ce « sacrifice » a ainsi permis, à l'échelle plus large du district, de protéger, dans un premier temps, d'autres localités. Le management du LUSI a aussi conduit à l'évacuation d'une partie de ces boues vers la rivière Porong. Ces réponses à l'événement catastrophique induisent cependant l'émergence de nouveaux risques : celui de la rupture de digue, menaçant les enjeux exposés en contrebas des levées, et celui de la pollution des eaux douces, avec l'implication toxique qu'elle peut engendrer sur la santé publique et la vie aquatique, jusqu'à l'embouchure du cours d'eau dans le détroit de Madura. Si le caractère anthropique de l'aléa du LUSI, avec le déclenchement accidentel par le forage BJPI de la compagnie *Lapindo Brantas*, est discuté, les risques qui émergent ainsi de sa gestion sont, quant à eux, sans conteste d'origine humaine. Les capacités de défense mises en place pour atténuer les effets de l'événement catastrophique, censées réduire la vulnérabilité²⁰⁸, tendent alors à affaiblir la résilience générale du territoire, en faisant apparaître de nouvelles fragilités qui sont à intégrer par les autorités (e.g. zonage du risque lié à une rupture de digues).

D'autre part, les espaces ensevelis par la boue, menacés et donc abandonnés, induisent une réorganisation territoriale. Elle prend forme à la fois au niveau local, avec par exemple la mise en place d'un refuge d'urgence (le marché couvert de Porong), et au niveau régional à l'instar de la reconfiguration de l'axe autoroutier principal reliant le sud de la province de Java oriental à sa capitale septentrionale, Surabaya. La question du retour à une vie normale, et notamment du relogement consécutif à l'évacuation des villages, s'imbrique également dans ce jeu scalaire qu'impliquent les réponses apportées à la catastrophe, avec aussi bien le problème du déracinement lié à l'installation des sinistrés indemnisés parfois à plusieurs dizaines de kilomètres de leur ancien lieu de vie, que la volonté de réclamer justice vis-à-vis des autorités actrices de la gestion par des manifestations protéiformes : des marches vers la capitale, des soulèvements contre les représentants provinciaux, des banderoles et stèles le long des levées à l'encontre de la société pétrolière et le pouvoir central. Le resserrement de ces démonstrations des victimes sur le

²⁰⁸ GILBERT, C., « La vulnérabilité, une notion vulnérable ? » in BECERRA, S., PELTIER, A. (dirs), *op. cit.*, p. 23-40

site même du désastre, et notamment le long des digues, témoigne peut-être d'une intention à entretenir une mémoire de celui-ci. Cette lutte contre l'oubli semble alors également dessiner la perception de l'événement du LUSI comme un risque potentiel à venir et à intégrer. La connaissance du risque est ainsi une forme de résilience qui permet de réduire la vulnérabilité future.

Les conséquences matérielles et immatérielles d'un événement catastrophique sur un territoire permettent d'évaluer la vulnérabilité de ce dernier, cependant que les mécanismes d'auto-organisation qui se mettent alors en place révèlent sa résilience²⁰⁹. La gestion du LUSI met en branle de nombreux acteurs, entre lesquels des connexions s'entrecroisent à différentes échelles : ainsi, par exemple, des scientifiques internationaux dont les conclusions permettent la compréhension du phénomène du LUSI et implique des positionnements tant des autorités nationales que des villageois, victimes locales. Les conséquences spatiales de l'événement sont également étendues à divers degrés. La prise en compte de ces complexes interactions à plusieurs niveaux scalaires conduit à la notion de résilience systémique : face à un choc, le système territorial (dans toutes ses dimensions, physiques, sociales, spatiales...), propose une réorganisation, conservant des éléments précédents le désastre, mais en adoptant de nouvelles trajectoires, à plusieurs échelles²¹⁰. De là émerge le concept de panarchie²¹¹, quelque soit le niveau d'intensité du phénomène perturbateur auquel le système territorial est soumis. La modélisation exposée par L.H. GUNDERSON et C.S. HOLLING (cf. **Annexe 4**) montre alors deux chemins possibles dans les connexions, d'une échelle à l'autre :

- la « **révolte** » : processus rapides d'effondrement (φ), à l'échelle inférieure, bouleversant des processus lents de conservation (κ) du système territorial, à l'échelle supérieure ;
- la « **mémoire** », faisant passer directement la conservation (échelle supérieure) à la réorganisation (ou renouvellement) du territoire (α) à un échelon en-dessous.

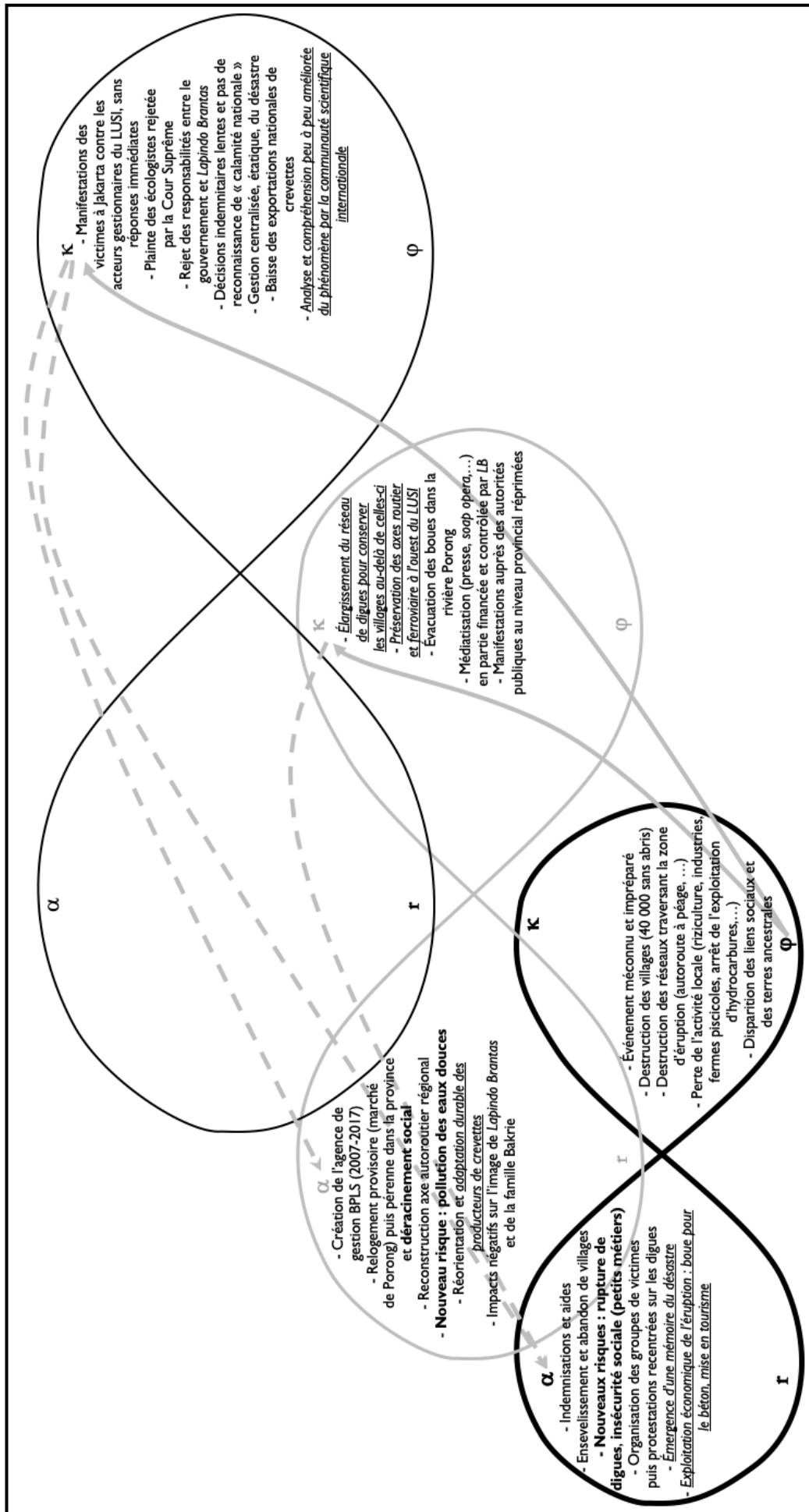
Damienne PROVITOLO interprète la panarchie en présentant le concept de « vulnérabilité résilience » qui « introduit l'idée que la vulnérabilité peut avoir un effet positif [sur un territoire] lorsque le changement conduit à une transformation positive, et que la résilience peut avoir un effet négatif »²¹², par le jeu des interactions scalaires. Vulnérabilité et résilience des systèmes sont alors perçus comme deux notions s'entremêlant, comme un « continuum ». Cette notion se détache ainsi de la vision classiquement centrée sur le fait qu'une vulnérabilité a des conséquences

²⁰⁹ RIGAUD, E., « La dialogique résilience-vulnérabilité » in BECERRA, S., PELTIER, A., *op. cit.*, p. 65-74

²¹⁰ DAUPHINE, A., PROVITOLO, D., *op. cit.*, p. 34-35

²¹¹ PIGEON, P., *op. cit.*, in BERNIE-BOISSARD, C. (dir.), *op. cit.*, p. 35-37

²¹² DAUPHINE, A., PROVITOLO, D., *op. cit.*, p. 37



forcément négatives, et qu'une résilience a des effets forcément positifs sur un territoire. Ce modèle intègre également trois niveaux de temporalités de l'événement perturbateur : avant, pendant et après. Dans le cas du LUSI, cette dimension diachronique est cependant encore floue, dans la mesure où l'événement n'a pas de durée encore déterminée : le désastre est en cours de réalisation, et il n'avait pas pu être anticipé, faute de connaissance du risque.

Nous proposons tout de même une transposition schématique de ces notions de panarchie et de « vulnérabilité-résilience » au cas du territoire soumis aux conséquences de cette éruption boueuse (**figure 30**), avec pour objectif de synthétiser le jeu des interactions scalaires complexes de vulnérabilité et de résilience à l'oeuvre dans cette catastrophe, en fonction des réponses que les acteurs lui ont apportées. Nous avons alors signifier certaines interdépendances dans ce couple vulnérabilité/résilience, en distinguant :

— la **dynamique positive** où la vulnérabilité transforme positivement le territoire, en accroissant la résilience d'un élément, à un autre niveau d'échelle. Ainsi de la méconnaissance au départ de l'aléa qui a permis un plus grand intérêt scientifique pour celui-ci au niveau international, lequel induit l'émergence d'une culture locale de ce risque, avec une prise de conscience par la population. De même, l'ensevelissement des 3 villages (vulnérabilité alors maximale), au coeur de l'éruption, par le système de digues, a permis de préserver d'autres villages alentours.

— la **dynamique négative** par laquelle la résilience a des conséquences néfastes, en affaiblissant la résilience à une autre échelle, en augmentant la vulnérabilité du territoire. C'est le cas des digues construites pour la résilience des villages à proximité du LUSI, mais qui présentent un nouveau risque, anthropisé, exposant les enjeux en contrebas à une vulnérabilité, en cas de rupture, d'autant plus accrue que ces levées procurent un faux sentiment de sécurité. Par ailleurs, les décisions d'indemnisations, autorisant le retour à un fonctionnement stable des sociétés, s'accompagne d'un déracinement des sinistrés relocalisés dans le territoire provincial, parfois à plus de 70 km de leur lieu de vie d'origine, pouvant augmenter la vulnérabilité sociale, posant par exemple la question de leur intégration dans le nouveau groupe.

Tous les éléments répertoriés dans le schéma ne peuvent cependant pas être apparentés à l'une ou l'autre de ces dynamiques. D'autre part, certains mériteraient davantage d'investigation afin, éventuellement, de les catégoriser : aussi, par exemple, les organisations des victimes permettent-elles une réelle restructuration sociale, dans une dynamique positive, ou au contraire participent-elles à la désunion et au délitement des liens initiés par le désastre, dans un mouvement davantage négatif ? Une analyse plus fine de terrain permettrait ainsi de définir d'autres relations « positives » ou « négatives » entre vulnérabilité et résilience.

CONCLUSION

L'évocation d'une éruption volcanique dirige bien souvent le locuteur vers les structures magmatiques. Celles-ci sont scrutées, surveillées, et leur analyse abonde dans la littérature scientifique. Le volcanisme sédimentaire, moins popularisé, constitue pourtant l'autre grande famille volcanique terrestre. L'analogie dépasse le simple cadre lexical (e.g. « morphologie conique », « cratère », « bombes », « panaches », « viscosité des écoulements »,...) et s'approfondit tant dans le contexte de formation (avec le point commun des zones de subduction) que dans les manifestations de surface des 2 types de système, obéissant à une polarisation tripartite des structures (solide, liquide, gazeux) permettant de les distinguer en 4 classes. Les dissemblances sont toutefois nombreuses. Ainsi de la nature des matériaux et fluides éruptés : les laves et les gaz d'origine magmatique diffèrent radicalement de la *mud breccia* et du méthane issus de zones de sédimentation accélérée et de décomposition de matière organique. C'est d'ailleurs dans le cadre de la recherche de ressource pétrolière que les *mud volcanoes* ont éveillé l'intérêt scientifique, la naissance de ceux-ci étant souvent liée aux contextes de formation d'hydrocarbures. À l'inverse, les volcans magmatiques sont davantage étudiés pour les risques qu'ils font peser sur certaines sociétés.

C'est dans ce théâtre scientifique que l'éruption du LUSI se déroule, depuis 2006, comme une pièce à part. Présumé *mud volcano* par ses émissions boueuses soudaines dans la préfecture du Sidoarjo, des analyses plaident davantage pour un système hybride, un SHHS dont les fluides sont alimentés en profondeur par une source ignée. Cela expliquerait à la fois la présence de boues (origine sédimentaire) et la prédominance de vapeur d'eau très chaude et de dioxyde de carbone (origine magmatique et hydrothermale), émis par pulsations régulières. D'aucuns le définissent alors en tant que premier SHHS observé fonctionnant comme un geyser avec projections détritiques. Le LUSI fait donc l'objet d'un engouement scientifique contribuant à développer la connaissance d'un phénomène jusque-là peu documenté et étudié. Beaucoup d'interrogations restent cependant en suspens, notamment quant à la durée de son éruption. L'enjeu est pourtant de taille puisque cette dernière a rendu inexploitable au moins 7 km² de terres, villages, et autres zones d'activités, bouleversant la vie de plus de 40 000 personnes vivant dans le Sidoarjo.

Les différents acteurs de ce territoire ont donc dû faire face à un événement catastrophique non anticipé. Comme toute perturbation effective marquante, l'éruption a été nommée. Son appellation *Lumpur Lapindo* fait alors référence à ses manifestations les plus

caractéristiques pour les habitants : la boue, qui se répand, ensevelissant leurs espaces de vie, ainsi que son association à la compagnie *Lapindo Brantas* désignée comme responsable du désastre. En effet, la thèse d'un possible déclenchement accidentel de ce phénomène naturel a révélé des imbrications d'intérêts dans la gestion de la catastrophe, notamment entre les gestionnaires des réparations et compensations financières, ralentissant l'indemnisation des victimes, lesquelles se sentent parfois peu considérées, ce qui accentue leur perception d'injustice.

Face à une situation critique, les responsables, politiques et économiques, sont de fait mis à l'épreuve, la résilience du territoire dépendant des arbitrages qu'ils opèrent²¹³. Ainsi, la gestion aléa-centrée choisie par le gouvernement national indonésien, typique du traitement des dangers géophysiques, a abouti à la fois à la volonté de circonscrire l'éruption, et à l'émergence de nouveaux risques anthropisés : la rupture de digues et la pollution, prolongeant paradoxalement les impacts du LUSI dans l'espace. En voulant adapter le territoire à la crise pérenne subie, les autorités ont donc augmenté la vulnérabilité de la population, illustrant, de fait, le volet de la notion de « vulnérabilité-résilience » qui permet de reconnaître les impacts négatifs d'une résilience.

Les collectivités humaines locales et même, dans une certaine mesure, régionales trouvent également des réponses ouvrant la voie à une réorganisation du territoire ajustée à cette catastrophe au temps long. Ainsi de la mise en tourisme des digues avec vue et déambulation sur le LUSI (même si, là aussi, une nouvelle vulnérabilité émerge de cette résilience avec la fragilisation sociale par l'emploi fait de petits métiers), ou encore de la résilience, par une dynamique positive cette fois, de certains producteurs de crevettes le long de la rivière Porong ayant pu adapter durablement leurs fermes d'exploitation.

D'autre part, les imbrications scalaires de cette résilience systémique montrent que l'événement dépasse largement le cadre territorial des zones directement impactées par le LUSI : l'aide, même si elle n'est pas internationale, provient du gouvernement indonésien et de la compagnie pétrolière transnationale *Lapindo Brantas* ; la gestion est organisée par l'Etat centralisé face à l'ampleur des conséquences spatiales d'aléas ayant affecté, sans doute irrémédiablement, à l'échelle humaine, les communautés locales proches de l'éruption (cette dernière est prévue durer encore plusieurs décennies) ; la population a réclamé justice auprès des dirigeants, de l'échelle locale (villages sinistrés) à l'échelon national (manifestations à Jakarta) en passant par le niveau régional (préfecture du Sidoarjo) ; des acteurs internationaux sont impliqués, à l'instar des scientifiques tentant de comprendre le phénomène. Tout ceci plaide en faveur d'une catastrophe

²¹³ GILBERT, C., *op. cit.*, in BECERRA, S., PELTIER, A. (dirs), *op. cit.*, p. 33-34

plutôt que d'un désastre²¹⁴, même si les incidences en terme de dommages matériels sont contenues essentiellement à l'échelle locale.

La catastrophe du LUSI met ainsi en lumière la manifestation d'un risque sur un territoire qui n'était pas préparé à celui-ci. Si l'analyse rétrospective n'est pas encore possible dans le mesure où l'éruption se poursuit encore, même si déjà une mémoire du risque semble se mettre en place avec l'entretien régulier du souvenir du lieu (e.g. avec les oeuvres d'artistes ou les banderoles des sinistrés, le long des digues, voire sur les boues asséchées) et du moment de la survenue du phénomène (commémorations au jour anniversaire le 29 mai, avec implantation de stèle par ex. en 2014), ce volcan particulier pourrait être un cas prospectif intéressant pour d'autres zones où des SHHS, ou plus largement SHGS, sont identifiés. Ainsi du delta du Tibre, en Italie, où la ville de Fiumicino, à une trentaine de km de Rome, est par endroit sujette à des explosions de gaz (CO₂ et CH₄), comme en 2013 près de l'enceinte aéroportuaire²¹⁵. Des chercheurs menés par G. CIOTOLI ont déterminé, par la composition des gaz expulsés, l'origine géothermique de l'alimentation du système, connectée à des intrusions ignées et ramenant également à la surface du méthane piégé dans les sédiments organiquement riches. Il s'agit donc pour eux d'un SHGS. A la différence du LUSI qui émet, par son caractère hydrothermal (SHHS), beaucoup de vapeur d'eau, le système sous-jacent du delta du Tibre est plus « sec », le risque se situant ainsi davantage dans l'émission éruptive de gaz, potentiellement dangereux par leur caractère explosif, toxique ou inflammable. La recherche plus spécifiquement orientée vers les *mud volcanoes* issus des SHGS/SHHS existe donc, intégrée notamment au projet « HOTMUD »²¹⁶ sous l'égide de A. MAZZINI, depuis 2019, destiné à mieux connaître les mécanismes de ces systèmes et leurs impacts au niveau planétaire.

En effet, les risques liés aux SHGS/SHHS dépassent l'échelle locale d'une ville ou d'un district, avec le rôle que leurs émissions peuvent jouer dans le renforcement de l'effet de serre planétaire. Ils ont été catégorisés comme tel par le GIEC (Groupe Intergouvernemental d'Experts sur le Climat)²¹⁷. Ils participent au relâchement de dioxyde de carbone et de méthane profondément enfouis. Ils semblent même avoir été, à l'échelle géologique, des moteurs des

²¹⁴ DAUPHINE, A., PROVITOLO, D., *op. cit.*, p. 19-20

²¹⁵ CIOTOLI, G., et al., « Tiber delta CO₂-CH₄ degassing : A possible hydrid, tectonically active Sediment-Hosted Geothermal System near Rome », *Journal of Geophysical Research : Solid Earth*, n° 121 (2015), p. 48-69

²¹⁶ « HOTMUD - From hydrothermal systems to mud volcanoes : Planet-scale impacts of piercements in sedimentary basins », projet financé par le Conseil de Recherche de l'Université d'Oslo. URL : <https://www.mn.uio.no/geo/english/research/networks/hotmud/> (consulté en mai 2021)

²¹⁷ CIOTOLI, G., et al., *op. cit.*, p. 66

périodes de réchauffement du Toarcien ou encore de l'Eocène, par le biais de dégazages massifs dans les Grandes Provinces Magmatiques comme celle du Karoo, en Afrique du Sud²¹⁸. Les enjeux de la recherche autour du phénomène auquel appartient le LUSI dépassent ainsi largement l'échelle des villages indonésiens sinistrés.

²¹⁸ SVENSEN, H., et al., « Hydrothermal venting of greenhouse gases triggering Early Jurassic global warming », *Earth and Planetary Science Letters*, n° 256 (2007) p. 554-566

RÉFÉRENCES

OUVRAGES GÉNÉRAUX

ANTOINE, J.M. (dir.), *Les mots des risques naturels*, Presses Universitaires du Mirail, Toulouse (2008), 128 p.

BEUCHER, S., REGHEZZA, M., VEYRET, Y. (dir.), *Les risques*, Bréal, Rosny-sous-Bois (2004), 208 p.

BOILLOT, G., *La dynamique de la lithosphère - Une introduction à la géologie*, Masson, Paris (1996), 130 p.

DERRUAU, M., *Les formes du relief terrestre - Notions de géomorphologie*, Armand Colin 8^e ed., Collection U, Paris (2010), 238 p.

DAUPHINE, A., PROVITOLLO, D., *Risques et catastrophes - Observer, spatialiser, comprendre, gérer*, Armand Colin 2^e ed., Paris (2013), 414 p.

MICHEL, F., *Dictionnaire illustré de géologie - Initiation aux sciences de la Terre*, Belin, Paris (2016), 304 p.

MORINIAUX, V. (dir.), *Les risques*, Editions du temps, Nantes (2003), 256 p.

VEYRET, Y. (dir.), *Les risques*, Sedes, Paris (2004), 256 p.

OUVRAGES SPÉCIALISÉS

BARDINTZEFF, J.-M., *Volcans*, Armand Colin, Paris (1993), 154 p.

BECERRA, S., PELTIER, A. (dirs.), *Risques et environnement : recherches interdisciplinaires sur la vulnérabilité des sociétés*, L'Harmattan, Paris (2009), 576 p.

BERNIE-BOISSARD, C. (dir.), *L'aménagement du territoire à l'épreuve des risques*, Presses Universitaires d'Aix-Marseille, collection Aménagements et Territoires, n°1, Aix-en Provence (2012), 118 p.

LEFEVRE, C., *Volcans et risques volcaniques*, Ellipses, Paris (2010), 234 p.

MARTIN, P., *Ces risques que l'on dit naturel*, Editions Eyrolles, Paris (2007), 506 p.

NOVEMBER, V., *Les territoires du risque*, Peter Lang SA, Berne (2002), 334 p.

PADAWANGI, R., in MILLER M.A., DOUGLASS, M. (eds.), *Disaster Governance in Urbanising Asia*, Ch. 4 « Muddy resistance : community empowerment in mudflow disaster governance in Porong, Sidoarjo, Indonesia », Springer Science, Singapore (2016) p. 61-84

PELTIER, A., *La gestion des risques naturels dans les montagnes d'Europe occidentale - Etude comparative du Valais (Suisse), de la Vallée d'Aoste (Italie) et des Hautes-Pyrénées (France)*, thèse de Géographie, sous la direction de GAZELLE, F., Université de Toulouse II-Le Mirail (2005), 743 p.

SCHNEIDER, J.-L., *Les traumatismes de la Terre - Géologie des phénomènes naturels extrêmes*, Vuibert, Société Géologique de France, Paris (2009), 198 p.

TAZIEFF, H., DERRUAU, M., *Le volcanisme et sa prévention*, Masson, Paris (1990), 256 p.

ARTICLES SCIENTIFIQUES

ABRAMS, M.A., « Significance of hydrocarbon seepage relative to petroleum generation and entrapment », *Marine and Petroleum Geology*, n°22 (2005), p. 457-477

AGUSTAWIJAYA, D.S, et al., « The Stability Analysis of the Lusi Mud Volcano Embankment Dams using FEM with a Special Reference to the Dam Point P10.D », *Civil Engineering Dimension*, vol. 14, n°2 (2012), p. 100-109

BADJA PRATAMA, B. et al., « Addressing the environmental risk from the mudflow disaster in Sidoarjo », *E3S Web of Conferences* 74, 12003 (2018), p.1-9

BALOGLANOV, E. E., et al. « Anomalies in gas-hydrogeochemical indicators of mud volcanoes in connection with seismic activity : On the basis of mud volcanoes data in Shamakhi-Gobustan (Azerbaijan) and Sakhalin Island (Russia) », *ISJ Theoretical & Applied Science*, 01, vol. 57 (2018) p. 176-185

BOSNAK, J.E., « Soap Opera and Muddy Affairs in Indonesia : The Cultural Politics of the Lapindo Mudflow Case (2006-2014) », *Bijdragen tot de Taal-, Land- en Volkenkunde* , vol. 171, n°4 (2015), p. 455-488

CHAPRON, et al., « Fluid-escape features as a precursor of a large sublacustrine sediment slide in Lake Le Bourget, NW Alps, France », *Terra Nova*, n°16 (2004), p. 305-311

CIOTOLI, G., et al., « Tiber delta CO₂-CH₄ degassing : A possible hybrid, tectonically active Sediment-Hosted Geothermal System near Rome », *Journal of Geophysical Research : Solid Earth*, n°121 (2015), p. 48-69

- CITA, M.B., et al., « Discovery of mud diapirism on the Mediterranean ridge : a preliminary report », *Boll. Soc. Geol. Ital.*, vol. 108 (1989), p. 537-543
- CUYLAERTS, M., et al., « Distribution and morphology of mud volcanoes and other fluid flow-related lake-bed structures in Lake Baikal, Russia », *Geo-Marine Letters* (2012), p. 383-394
- DAVIES, R.J. et al., « The East Java mud volcano (2006 to present): An earthquake or drilling trigger? », *Earth and Planetary Science Letters*, n°272 (2008), p. 627-638
- DAVIES, R.J., et al., « Probabilistic longevity estimate for the LUSI mud volcano, East Java », *Journal of the Geological Society*, vol. 168 (2011), p. 517-523
- DAVIES, R.J., SWARBRICK, R., « Lusi'cough - a diagnosis », *Geology Today*, vol. 23, n°5 (2007),) p. 166-169
- DEQUINCEY, O., « Lusi, volcan de boue de Sidoarjo (Indonésie) : naissance, controverses et impacts », *planet-terre.ens-lyon.fr*, ENS Lyon (2012)
- DEVILLE, E., GUERLAIS, S.-H., « Cyclic activity of mud volcanoes : evidences from Trinidad (SE Caribbean), *Marine and Petroleum Geology*, n°26 (2009), p. 1681-1691
- DIMITROV, L.I., « Mud volcanoes—the most important pathway for degassing deeply buried sediments », *Earth-Science Reviews*, n°59 (2002), p. 49-76
- DRAKE, P., « Under the mud volcano : Indonesia's mudflow victims and the politics of testimony », *Indonesia and the Malay World*, vol. 41, n°121 (2013), p. 299-321
- DRAKE, P., « Multiple visions of Indonesia's mud volcano : understanding representations of disaster across discursive settings », *Disasters*, n°40 (2016), p. 346-364
- DRAKE, P., « Indonesia's Accidental Island: Composing the Environment in the Echo of Disaster », *Environmental Communication*, vol. 12 (2018), p. 261-273
- EKAUATI, J, et al., « Analysis of GIS-Based Disaster Risk and Land Use Changes in The Impacted Area of Mudflow Disaster Lapindo », *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, n°409 (2020), p. 1-13
- FARIDA, A., « Reconstructing Social Identity for Sustainable Future of Lumpur Lapindo Victims », *Procedia Environmental Sciences*, n°20 (2014) p. 468-476
- FITRIANTO, A.R., « Shrimp Farmer's Innovation in coping with disaster (a case study in Sidoarjo Mud Volcano disaster toward shrimp farmers' responses) », *Procedia Economics and Finance*, n°4 (2012), p. 168-176

- HIEKE, W., « The August 27, 1886 earthquake in Messenia (Peloponnesus) and reported flames over the Ionian Sea — a Mediterranean Ridge gas escape event ? », *Marine Geology*, n°207 (2004), p. 259-265
- IGUAGGIATO, S., et al., « The Arjuno-Welirang volcanic complex and the connected Lusi system : Geochemical evidences », *Marine and Petroleum Geology*, n°90 (2018), p. 67-76
- KARYONO, K. et al., « Lusi, a clastic-dominated geysering system in Indonesia recently explored by surface and subsurface observations », *Terra Nova*, vol. 29, n°1 (2017), p. 13-19
- KOPF, A.J., « Significance of mud volcanism », *Reviews of Geophysics*, n°40, 2 (2002), p. 1-52
- KRISNAYANTI, B.D., AGUSTAWIJAYA, D.S., « Characteristics of Lusi mud volcano and its impacts on the Porong River », *Journal of degraded and mining lands management*, vol.1, n°4 (2014), p. 207-210
- KURE, S., et al., « Effects of mud flows from the LUSI mud volcano on the Porong River estuary, Indonesia », *Journal of Coastal Research*, Special Issue n°70 (2014), p. 568-573
- MANGA, M., et al., « Earthquake triggering of mud volcanoes », *Marine and Petroleum Geology*, n°26 (2009), p. 1785-1798
- MAZZINI, A., « 10 years of Lusi eruption: Lessons learned from multidisciplinary studies (LUSI LAB) », *Marine and Petroleum Geology*, n°90 (2018), p. 1-9
- MAZZINI, A. et al., « Triggering and dynamic evolution of the LUSI mud volcano, Indonesia », *Earth and Planetary Science Letters*, n°261 (2007), p. 375-388
- MAZZINI, A., et al., « Strike-slip faulting as a trigger mechanism for overpressure release through piercement structures. Implications for the Lusi mud volcano, Indonesia », *Marine and Petroleum Geology*, n°26 (2009), p. 1751-1765
- MAZZINI, A., et al., « A new hydrothermal scenario for the 2006 Lusi eruption, Indonesia. Insights from gas geochemistry », *Earth and Planetary Science Letters*, 317–318 (2012), p. 305-318
- MAZZINI, A. et al., « The geochemistry and origin of the hydrothermal water erupted at Lusi, Indonesia », *Marine and Petroleum Geology*, n°90 (2018), p. 52-66
- MAZZINI, A., ETIOPE, G., « Mud volcanism : an updated review », *Earth-Science Reviews*, n°168 (2017), p. 81-112
- MUHTADA, D., « Ethics, Economics and Environmental Complexity :The Mud Flow Disaster in East Java », *Systems Research and Behavioral Science* (2008), p. 181-191

NERMOEN, A., et al., « Strike-slip faulting as a trigger mechanism for overpressure release through piercement structures. Implications for the Lusi », *Marine and Petroleum Geology*, n°26 (2009), p.1751-1765

NURUDDIN, M.F., et al., « Sidoarjo mud: creating worth from waste », *WIT Transactions on Ecology and The Environment*, vol. 192 (2015), p. 309-315

ODONNE, F., et al., « Mud volcano growth by radial expansion: Examples from onshore Azerbaijan », *Marine and Petroleum Geology February*, vol. 112 (2020), p. 1-22

RUDOLPH, M.L., et al., « A prediction of the longevity of the Lusi mud eruption, Indonesia », *Earth and Planetary Science Letters*, n°308 (2011), p.124-130

SCHILLER, J., et al., « Learning from the East Java mudflow - disaster politics in Indonesia », *Indonesia*, n°85 (2008), p. 51-77

SVENSEN, H., et al., « Hydrothermal venting of greenhouse gases triggering Early Jurassic global warming », *Earth and Planetary Science Letters*, n°256 (2007) p. 554-566

SVENSEN, H.H., et al., « Modelling of gas generation following emplacement of an igneous sill below Lusi, East Java, Indonesia », *Marine and Petroleum Geology*, n°90 (2018), p. 201-208

YUSIFOV, M., RABINOWITZ, P., « Classification of mud volcanoes in the South Caspian Basin, offshore Azerbaijan », *Marine and Petroleum Geology*, n°21 (2004), p. 965-975

ARTICLES ET VIDEOS DE PRESSE

Adi Channel. « Sejarah awal mula lumpur Lapindo : Benarkah gempa bumi jadi penyebab ? » (*Le tremblement de terre est-il la cause des boues de Lapindo ?*), [en ligne], URL : <https://www.youtube.com/watch?v=KVtDSzkUes0> (consulté en avril 2021)

Article de Caesar Akbar, juin 2020. Dans : *journal tempo.co*, [en ligne], URL : <https://bisnis.tempo.co/read/1351020/lanjutkan-pengendalian-lumpur-sidoarjo-pupr-siapkan-rp-2397-m> (consulté en avril 2021)

Cerita Kesuksesan Korban Semburan Lapindo (*Histoires de réussite des sinistrés*), 30 mai 2016. *Kompas TV*, [en ligne], URL: <https://www.youtube.com/watch?v=QujQYFLtnjc> (consulté en mai 2021)

Décret présidentiel n°21 de l'année 2017, transmis au secrétariat du Cabinet de la République d'Indonésie, [en ligne], URL : <https://setkab.go.id/en/president-jokowi-dissolves-sidoarjo-mudflow-mitigation-agency/> (consulté en avril 2021)

ANNEXES

ANNEXE I : EXTRAITS DE L'ENTRETIEN RÉALISÉ AVEC FRANCIS ODONNE, PROFESSEUR ÉMÉRITE DE GÉOLOGIE ET SÉDIMENTOLOGIE, LE 18 MAI 2021

Mathieu Huyez (MH) présente les contours de son travail de mémoire de recherche sur le LUSI

Francis Odonne (FO) : En 1920, des gens ont eu des problèmes équivalents en Indonésie, par là-bas. J'en parlais avec un collègue avec qui je bosse, un pétrolier, qui disait que lors d'un congrès des gens disaient, dans la salle, qu'il y a 100 ans il y avait eu un phénomène similaire au LUSI (mais pas au même lieu). La prospection pétrolière a pas deux siècles, c'est récent...

Mathieu Huyez : Vous, vous travaillez sur les *mud volcanoes* d'Azerbaïdjan ?

FO : Oui, voilà...

MH : Ce sont les vrais *mud volcanoes* on va dire.

FO : Voilà, c'est ça... Oui, ils rejettent du méthane et pas du soufre, ou du CO₂ comme ceux qui sont à proximité des volcans. (...) Les vrais *mud volcanoes* sédimentaires rejettent du méthane et ça ne sent pas.

MH : Il y a d'autres manifestations sédimentaires comme les *sand boils*, dans le lac du Bourget. Faut-il des contextes d'hydrocarbures obligatoirement pour avoir des *mud volcanoes* (MVs)?

FO : C'est vrai que souvent, les MV sont liés à des zones de sédimentation très importante, les sédiments sont mal compactés et quand ils se compactent progressivement, ils vont évacuer les fluides, en même temps qu'il y a eu de la maturation organique : on évacue du méthane, de la flotte, de l'huile, tout ressort. Y a une quantité importante de gaz, c'est le gros moteur.

MH : Du pétrole ressort ?

FO : Oui

MH : Ça fait partie de la *mud breccia* ?

FO : La *mud breccia* c'est ce qui ressort, de la boue avec des fragments, du substratum profond, quelques fois des roches mères. En Azerbaïdjan, c'est une formation qui provient du miocène, avec des grès qui viennent de la roche mère.

MH : En Français il y a une traduction pour *mud breccia* ?

FO : Non... Eventuellement de la brèche de boue

(...)

MH : Mais les bombes c'est dans tous les MVs ?

FO : Non... c'est ceux qui ont ce genre de truc.. Tu vois, l'Ayazakhtarma, on n'a jamais trouvé d'impact de bombe.

(...)

FO : Tu vas voir, je vais te montrer des trucs... Voilà.. *(il montre une vidéo)*. Fin d'éruption sur l'Otman, tu vas voir les bombes. Projetées à une cinquantaine de mètres. C'est celui là. Il a fait une coulée fantastique. Au bord de la Caspienne. Bakou est là. L'Otman est juste au-dessus du terminal pétrolier de Sangatchal. Il fait des coulées qui descendent jusqu'en bas.

MH : Les forages sont où ?

FO : Y en a autour du Lokbatan mais c'est résiduel, les grosses exploitation sont en mer, au large de la pointe de la péninsule.

MH : C'est une zone de prisme d'accrétion ?

FO : C'est plutôt un bassin d'avant-pays. Tu as 25 km de trou sédimentaire que les fleuves n'arrivent pas à combler.

MH : Pour revenir au Lusi, où il y a la thèse accidentelle. Est-ce qu'il y a eu par exemple dans cette région des forages pétroliers qui ont conduit à l'émergence d'un MV ? Là, ou ailleurs.

FO : Non, je ne crois pas. Le problème c'est qu'il y en a tellement, 300 ou 400 naturels, donc ça sort de toute façon. Sous forme très fluide ou...

(...)

FO : Ça c'est sur le côté d'un volcan qui s'appelle le Koturdag. Le Koturdag, je vais te le montrer. Ça fait une langue qui fait 2 km et qui sort d'un anticlinal. Et sur place, tu as cet espèce de dôme, avec la sortie. A la base ça donne la coulée. On avait mis une marque de peinture en 2014. En septembre on l'a trouvé à 5 mètres, ça fait 4 cm par jour. C'est un espèce de diapir de boue, cad que ce qui sort est plus épais, beaucoup plus visqueux. Mais à proximité de ce truc-là, il y a quand même des piscines (salsas) et des griffons, avec de l'huile, du pétrole. Là on est sur le Dashgil, à côté de Bakou, avec des circuits touristiques.

MH : Donc il n'y a pas de risques avec ces volcans ?

FO : Je vais te montrer les risques. *(il montre une vidéo des « bains de boue » faits par des scientifiques de l'équipe)*

MH : Ah oui, c'est assez du différent du LUSI

FO : C'est très différent du LUSI. Le LUSI c'est de la boue très fluide avec énormément de gaz. C'est pour ça qu'il y a suspicion d'un forage pétrolier qui soit allé « grattouillé » un truc très profond.

MH : Et là le gaz qui s'échappe c'est du méthane.

FO : C'est du méthane. Plus de 98% des gaz qui s'échappent c'est du méthane.

MH : Tous les MVs éjectent à 98% du méthane ?

FO : En grande majorité oui. C'est pour ça que l'origine volcanique elle arrive très vite si tu trouves autre chose que du méthane. On parlait des dangers tout à l'heure... *(il montre un collègue azéri qui est jusqu'au genou dans un cratère de boue)*

MH : Mais donc c'est pas chaud ?

FO : Jamais. 17°C maximum... Ils ne peuvent pas descendre, la densité de la boue a un poids qui fait que tu flottes... *(rires)* Les gars voulaient qu'on parte sur le terrain avec des masques à gaz!

MH : Ah TOTAL finançait l'expédition ?

FO : C'est TOTAL oui qui finançait le truc.. Si on regarde ce qui sort. Classiquement, tu as un flot de boue qui sort...

(...)

MH : De quoi est faite cette boue ?

FO : c'est des silts, et de l'argile, et de l'eau et du gaz. Et parfois du pétrole. Quand tu as des reflets un peu sombre tu as des hydrocarbures. Et parfois plus épais. Là on est sur le Dashgil.

(...)

MH : La couleur rouge c'est que le gaz a brûlé.

FO : Oui, ça fait de la boue cuite, mais c'est très très localisé. Le Dashgil est touristique pour ça : un machin qui bulle, qui coule un peu, des trucs comme ça. Tu marches en toute tranquillité sur le bord. Mais si tu vas trop près, t'as la jambe qui tombe dans la boue. On voit l'huile. Des griffons morts et d'autres actifs. Il change un peu tout le temps. Y a des trucs actifs, certains en permanence. Y en a qu'on a vu tout le temps éteint. Ça c'est des coniques. On a l'impression que les cônes fonctionnent comme ça : des galettes sur le haut et éventuellement des galettes qui débordent. Ou alors des trucs plus plats comme l'Ayazakhtarma qui a lui de grandes lignes de déformation. Là c'est l'Akhtarma-Pashaly avec ses galettes actives. C'est là où les mesures de gravimétrie ont montré un déficit de masse très significatif.

MH : Qu'est-ce que c'est ? Ça se vide en dessous ?

FO : Non, en-dessous c'est fait de boue liquide, moins dense. La densité de la boue sèche c'est 2,2 et la boue liquide c'est 1,3 à peu près.

(...) On n'arrivait pas à comprendre comment un volcan complètement plat arrive à pousser ses bords. Dans un prisme d'accrétion, le prisme grandit et s'épaissit, alors qu'en fait le prisme est là, sur les bords. Donc, on a un volume de boue liquide très important capable de pousser les bords. Comme si tu versais du lait ou un yaourt sur ta table et le yaourt est en train de s'étaler.

50' MH : Mais la boue elle ressort à la surface ?

FO : Elle sort, par différents orifices, mais tu as vu sur l'Akhtarma-Pashaly, quand on regarde une galette qui vient de s'installer, elle est déformée et plissée tout autour, parce que chaque galette s'étale. On a un trou de matière qui est très important. Que ce soit sur l'Ayazakhtarma ou sur l'Akhtarma-Pashaly, la sortie de boue ne fait pas de relief parce que ça flotte, tu es sur une espèce

de gros coussin, de boue liquide. Et ça pousse les bords en faisant un prisme. D'où les failles inverses sur la périphérie.

MH : Mais ces boues sont quand même alimentées très profondément.

(...)

FO : (...) L'Otman Bosnag... C'est celui qui est au-dessus du terminal de Sangatchal, et qui fait aussi des coulées qui ont inquiété les gens, la coulée s'est arrêtée à quelques dizaines de mètres des cuves de pétrole et gaz.

(...)

FO : (...) Voilà l'Ayaz vu de loin. Il fait 3 km... 2 km dans ce sens là, un plateau complètement plat. Le seul truc qui ait du relief c'est la couronne en périphérie. Qui fait 30 mètres de haut, si c'est pas plus. Pendant 3 km, tu ne varies pas en altitude. Tout plat. Il n'y a de la boue liquide, en affleurement, qu'au centre. Sur le bord, tu as des lacs, et des doubles lacs sur la périphérie. C'est de l'eau. Est-ce que j'ai des photos ?.. Le relief, mis à part des aspérités locales (...) Là encore des stries horizontales. Zones déformées avec des zones décrochantes.

(...)

MH : Donc les MV il y en a en mer, beaucoup, mais apparemment pas dans les lacs d'eau douce, à part le Baïkal, d'après ce que j'avais vu. Mais pourquoi ?

FO : Je ne sais pas. Il faut voir d'où vient l'origine du Baïkal.

(M.H. explique brièvement l'origine de la sédimentation rapide du Baïkal avec les apports de la Selenga)

FO : Alors, les volcans de boue, c'est toujours dans les zones de sédimentation rapide. C'est pour ça que tu en as dans le prisme des Antilles, des Barbades, avec l'Orénoque qui nourrit le prisme, qui est très épais au Sud et qui s'amincit au Nord *(il fait un schéma en expliquant)*, avec un apport sédimentaire très important, donc un empilement qui s'accroît avec le prisme.

MH : Donc ce n'est pas lié à la convergence des plaques ?

FO : Ah si, c'est les deux mon général ! *(il poursuit son schéma)* Le prisme avec la subduction et l'Orénoque qui apporte le volume sédimentaire très important.

(...)

105' FO : Si on en revient à ton LUSI, qu'est-ce que tu veux montrer ? Tu vas faire quoi ?

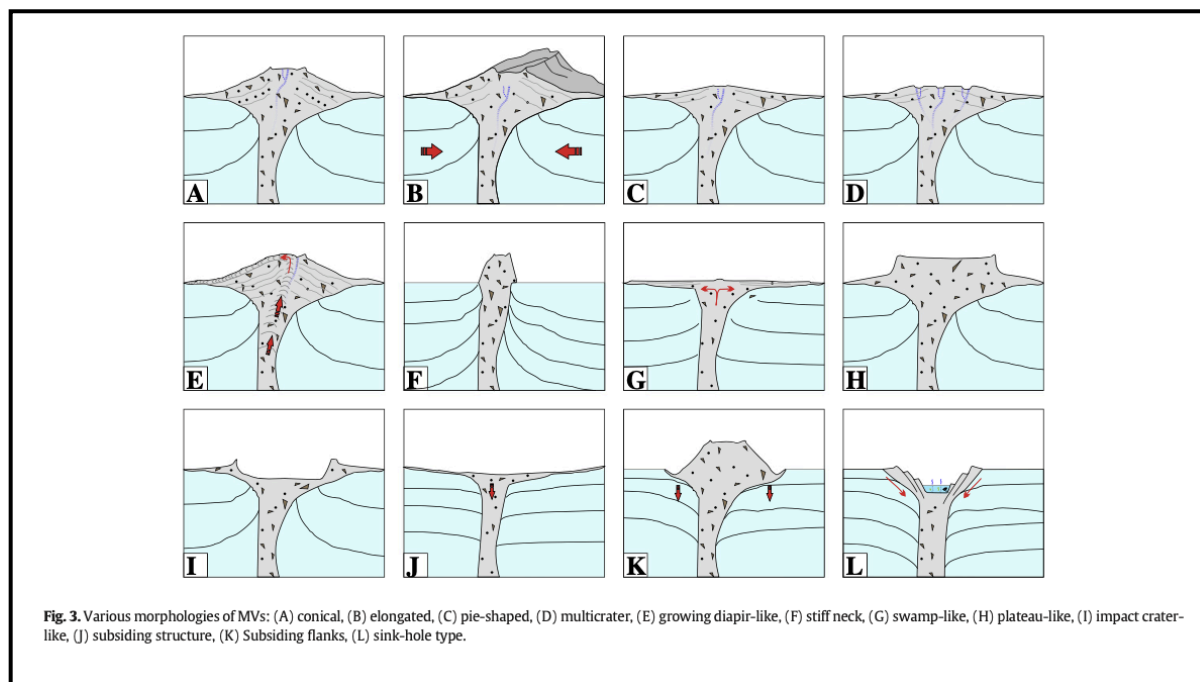
MH explique qu'il tente de définir la place du LUSI parmi les MVs, et qu'il prend l'angle de la gestion de la catastrophe en Indonésie. Il tentera une comparaison entre MVs et volcans magmatiques puisque le LUSI est entre les deux types, un SHHS.

FO : Oui, voilà. D'accord. Et alors, y a les gaz qui vont t'aider à faire le tri, parce que les vrais MVs c'est que du méthane, et ceux qui ont un moteur volcanique, tu vas avoir du CO₂, tu vas avoir du soufre, les températures, tu ne vas pas te baigner dedans.

(...)

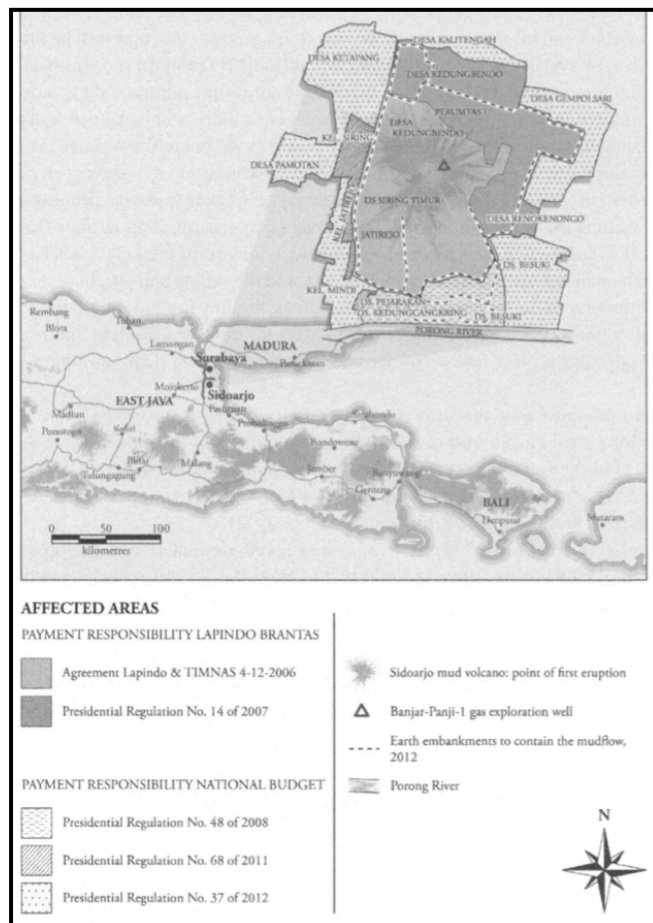
ANNEXE 2 : MORPHOLOGIES DES MUD VOLCANOES RÉPERTORIÉES PAR A. MAZZINI ET G. ETIOPE

(Source : MAZZINI, A., ETIOPE, G., *op. cit.*, 2017, p. 86)



ANNEXE 3 : EVOLUTION DE LA RÉPARTITION DES ZONES D'INDEMNISATIONS ENTRE LAPINDO BRANTAS ET LE GOUVERNEMENT INDONÉSIEN ENTRE 2006 ET 2012

(Source : BOSNAK, J.E., *op. cit.*, 2015, p. 462)



ANNEXE 4 : LE MODÈLE DE PANARCHIE D'APRÈS L.H. GUNDERSON ET C.S. HOLLING

(Source : DAUPHINE, A., PROVITOLO, D., *op. cit.*, 2013, p. 36)

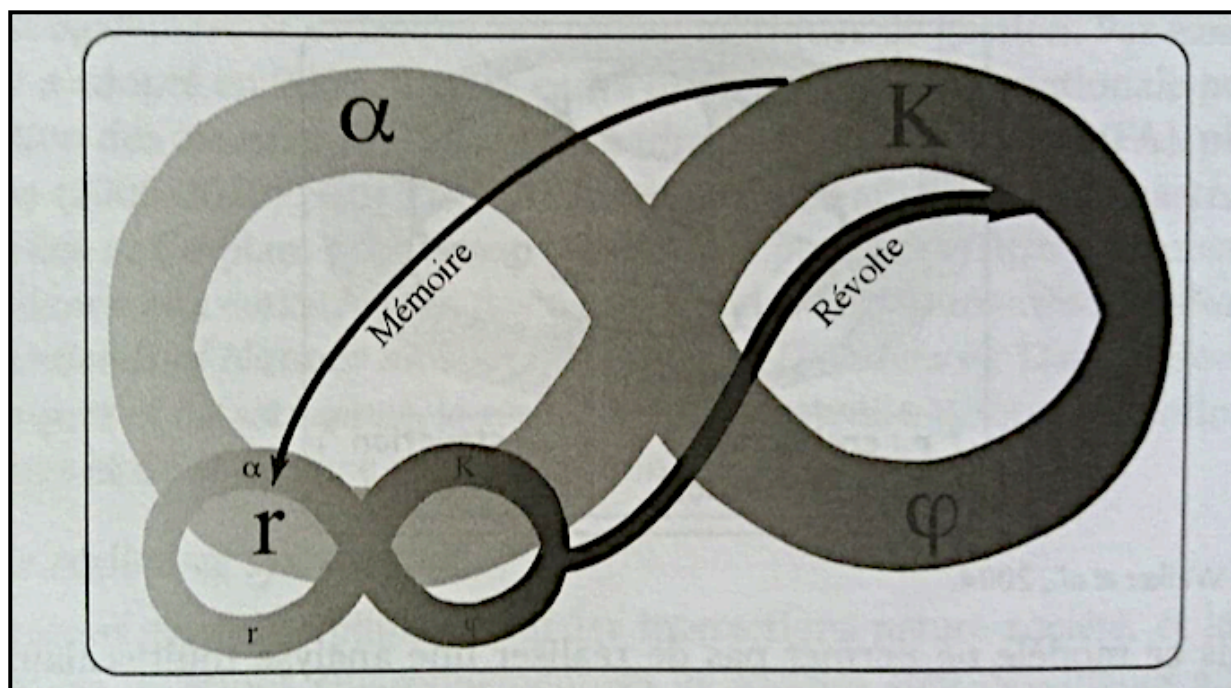


TABLE DES FIGURES

Figure 1a : Le Touragai, volcan sédimentaire dressé sur la plaine de la Koura en Azerbaïdjan.....	13
Figure 1b : Le Nevado Ojos del Salado s'élevant à près de 6900 m. d'altitude.....	13
Figure 2 : Carte de localisation des principaux toponymes employés en référence à l'Azerbaïdjan	17
Figure 3 : Expulsion de <i>mud breccia</i> assez visqueuse, avec bulle de méthane, dans le Dashgil, en Azerbaïdjan.....	17
Figure 4 : Classification synthétique comparative des types éruptifs des volcans magmatiques et sédimentaires en fonction des 3 pôles communs caractérisant leurs émissions.....	21
Figure 5 : Carte de la tectonique des plaques et de la répartition des principaux volcans magmatiques actifs.....	28
Figure 6 : Planisphère de la spatialisation des volcans sédimentaires.....	29
Figure 7 : Schéma synthétique des mécanismes de pression à l'origine de la formation des volcans sédimentaires.....	33
Figure 8 : Vue en coupe simplifiée comparée de la dynamique de formation et de la structure interne des volcans sédimentaires et magmatiques en contexte de subduction.....	36
Figure 9 : Photo satellite prise au-dessus du Lusi, district de Sidoarjo, Java et localisation du Lusi..	39
Figure 10 : Vue aérienne de la zone centrale du LUSI, en saison humide, avec complexe volcanique magmatique de l'Arjuno-Welirang en arrière-plan.....	40
Figure 11 : Stratigraphie à l'aplomb du Lusi.....	40
Figure 12 : Schéma en coupe des différentes sources d'eau et de gaz du LUSI, mettant en lumière les interactions entre le complexe magmatique de l'Arjuno-Welirang et ce volcan de boue particulier	44
Figure 13 : Les 4 étapes du cycle éruptif du Lusi.....	46
Figure 14 : Localisation du LUSI dans le territoire du district (<i>Kabupaten</i>) du Sidoarjo et de la province de Java oriental, en Indonésie.....	50
Figure 15 : Vue en coupe schématique du puits de forage pétrolier avec remontée accidentelle des boues de forage et fluides des couches sédimentaires vers la surface.....	52
Figure 16 : Répartition des sites éruptifs et événements apparus la première semaine d'éruption du LUSI, avec alignement le long de la faille de Watukosek	53
Figure 17 : Couches stratigraphiques et sources des fluides migrant vers la surface	57

Figure 18a : Vue aérienne oblique de la zone inondée par l'éruption (panache blanc), au bout d'une année.....	60
Figure 18b : Vue aérienne oblique de la zone inondée par l'éruption, au bout d'une dizaine d'années, suivant un axe est-sud-est/ouest-nord ouest.....	60
Figure 19 : Maison dégradée et rendue inhabitable par la subsidence de la zone, au sud-est du périmètre endigué contre les flots de boue.....	61
Figure 20 : Photo aérienne oblique prise par drone en limite nord-ouest du périmètre endigué du LUSI, dans le secteur du village de Ketapang protégé par une levée.....	61
Figure 21 : Evolution de l'emprise spatiale de la boue du LUSI.....	63
Figure 22a : Digue confortée par des gabions, à l'ouest.....	66
Figure 22b : Levée en terre construite au sud-est du LUSI.....	66
Figure 22c : Rupture de la digue à l'est de l'éruption en avril 2011.....	66
Figure 23 : Sortie du conduit évacuant une partie de la boue émise par le LUSI et se déversant dans la rivière Porong, au sud de la zone.....	67
Figure 24 : Cartographie des impacts du LUSI : enjeux et gestion spatiale d'une catastrophe du temps long.....	69
Figure 25 : Banderole affichée dans le village de Siring partiellement inondé après une rupture de digue en novembre 2006.....	79
Figure 26 : Manifestants s'enchaînant devant le palais présidentiel avec des cordes, en avril 2007..	79
Figure 27 : Enfants bénéficiant d'une salle de classe dans le marché couvert de Porong.....	79
Figure 28 : Mise en tourisme du LUSI.....	83
Figure 29 : <i>Survivant</i> , oeuvre de l'artiste Dadang Christanto réalisée en 2014 pour la commémoration du 8 ^{ème} anniversaire du début de l'éruption du LUSI.....	83
Figure 30 : Le territoire face au désastre du LUSI : interactions scalaires de vulnérabilité et de résilience - Approche panarchique.....	88

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Exemple de lexique morphologique comparatif illustré des principales structures d'émissions des volcans magmatiques et sédimentaires.....	15
Tableau 2 : Comparaison de la terminologie, des temporalités et des significations de l'activité observable des volcans magmatiques et sédimentaires.....	19
Tableau 3 : Classification illustrée comparée des types de volcans magmatiques et sédimentaires.....	24
Tableau 4 : Evolution des types d'occupation du sol dans la zone impactée par l'éruption du LUSI (en %)	62
Tableau 5 : Les facteurs augmentant ou diminuant la perception d'une catastrophe : quels sont leurs degrés d'influence pour les victimes du désastre du LUSI ?.....	76

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1 : Extraits de l'entretien réalisé avec Francis Odonne, Professeur émérite de géologie et sédimentologie, le 18 mai 2021.....	100
Annexe 2 : Morphologies des mud volcanoes répertoriées par A. Mazzini et G. Etiope.....	104
Annexe 3 : Evolution de la répartition des zones d'indemnisations entre Lapindo Brantas et le gouvernement indonésien entre 2006 et 2012.....	104
Annexe 4 : Le modèle de panarchie d'après L.H. Gunderson et C.S. Holling.....	105

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	3
SOMMAIRE.....	4
INTRODUCTION.....	5
PREMIÈRE PARTIE - QUELLE PLACE ATTRIBUER AU LUSI DANS LA CLASSIFICATION DES STRUCTURES VOLCANIQUES TERRESTRES ? MISE EN PARALLÈLE DES SYSTÈMES VOLCANIQUES MAGMATIQUES ET SÉDIMENTAIRES.....	11
CHAPITRE 1 - Une apparente similarité de formes à la surface.....	12
1. Une morphologie des <i>mud volcanoes</i> visuellement semblable à celle des volcans magmatiques, mais dans des proportions moindres.....	12
2. Quelles sont les ressemblances dans l'activité et les manifestations des deux types de volcans ?	16
3. Tentative de typologie comparée des volcanismes magmatique et sédimentaire : manifestations éruptives et morphologies associées.....	20
CHAPITRE 2 - Des alimentations profondes différenciées.....	27
1. Confrontation de la distribution spatiale des deux types de volcanisme : des contextes géologiques de formation divergents ?.....	27
2. Mise en parallèle des mécanismes de formation des deux systèmes volcaniques, de l'alimentation profonde à la subsurface.....	31
3. Synthèse : un exemple comparé schématisé de la structure interne des deux types de volcanisme.....	35
CHAPITRE 3 - Le cas du LUSI : un système hybride ?.....	38
1. Les critères d'appartenance du <i>Lumpur Sidoarjo</i> au volcanisme sédimentaire classique.....	38
2. Sur la piste d'un SHGS/SHHS (Sediment-Hosted Geothermal/Hydrothermal System).....	42
3. Le LUSI, un système de type geyser ?.....	45
CONCLUSION DE LA PREMIÈRE PARTIE : Le LUSI, un événement volcanique à part.....	47

DEUXIÈME PARTIE - DE LA COMPRÉHENSION SCIENTIFIQUE AUX IMPLICATIONS SOCIÉTALES DU LUSI : LES FORMES DE GESTION TERRITORIALE D'UNE CATASTROPHE IMPRÉPARÉE S'INSCRIVANT DANS LA DURÉE....49

CHAPITRE 1 - Un aléa encore mal cerné par les scientifiques.....51

1. La thèse du déclenchement accidentel de ce phénomène naturel..... 51
2. L'hypothèse d'un affaiblissement des couches par la sismicité de faille..... 53
3. Une éruption d'une durée indéfinie ?..... 55

CHAPITRE 2 - La catastrophe dans l'espace-temps : Réduire une crise aux contours spatio-temporels mouvants..... 59

1. L'ampleur spatiale de l'éruption du LUSI : éléments diachroniques des impacts évolutifs.....59
2. Contenir et évacuer les boues du LUSI : quelle spatialisation de la catastrophe la gestion induit-elle ?.....64
3. De la catastrophe au risque : un événement se réalisant puis s'anticipant et conduisant à de nouveaux dangers anthropisés..... 68

CHAPITRE 3 - Faire face au désastre : les réponses des acteurs dans la dynamique de résilience du territoire.....72

1. L'indemnisation de la catastrophe : les imbrications du jeu de responsabilités entre les pouvoirs publics et les intérêts de l'entreprise *Lapindo Brantas*.....72
2. La perception de la catastrophe par la population et le statut de victime.....75
3. La place de la population dans la gestion des conséquences de l'événement éruptif : capacités d'adaptation et formes de résilience..... 81

CONCLUSION DE LA DEUXIÈME PARTIE : Résilience systémique : *panarchie* et « *vulnérabilité résilience* » dans le territoire faisant face à l'éruption du LUSI..... 86

CONCLUSION..... 91

RÉFÉRENCES.....95

ANNEXES.....100

TABLE DES FIGURES.....106

LISTE DES TABLEAUX.....108

LISTE DES ANNEXES..... 108

TABLE DES MATIÈRES.....109

RÉSUMÉ

Parler d'éruption fait appel à des images de coulées laviques ou encore de projections de cendres. Pourtant, le 29 mai 2006 a commencé une catastrophe liée à un aléa volcanique méconnu : l'éruption du *Lumpur Sidoarjo*, sur l'île de Java, en Indonésie. Associé à un volcan de boue, ce phénomène naturel semble plus difficile à cerner, se situant à la croisée des volcanismes magmatique et sédimentaire. Le LUSI se distinguerait alors en tant que SHHS (*Sediment-Hosted Hydrothermal System*) par la composition des gaz qu'il émet (vapeur d'eau et CO₂ essentiellement) et la température élevée de ceux-ci, corroborant l'hypothèse d'une source ignée profonde dans la dynamique interne de ce système volcanique.

Cette éruption de boue a contraint plus de 40 000 personnes à se déplacer, abandonnant leurs villages. La gestion de cette catastrophe, qui implique des réponses spatio-temporelles réorganisant le territoire impacté et la vie des sinistrés, évolue au gré du désastre en cours de réalisation. Cette gestion doit également intégrer les nouveaux risques liés au LUSI, dont certains, anthropisés, aboutissent à de nouvelles vulnérabilités. Cela complexifie la résilience territoriale, en imbriquant différents acteurs et niveaux scalaires.

Mots-clés : volcanisme magmatique - volcan de boue - LUSI - gestion de catastrophe - résilience systémique

ABSTRACT

Talking about eruption refers to lava flow or ash release. Nevertheless, on May 29, 2006, a disaster linked to an unrecognized volcanic hazard has led off : the eruption of Lumpur Sidoarjo in Java, Indonesia. Connected to a mud volcano, this natural phenomenon seems tougher to encompass, placed in-between magmatic and sedimentary volcanisms. Hence, LUSI may single out as a SHHS - i.e. Sediment-Hosted Hydrothermal System - via its emitted high-temperature gaz contents (mostly steam and CO₂), in line with the hypothesis of a deep igneous intrusion in the internal dynamic of this volcanic system.

More than 40 000 people were forced to evacuate in front of the mud eruption, leaving homes and businesses. The management of this disaster, which implies territorial and social life's overhaul with space-time answers, shifts over the risk's fruition. This governance has to embed new risks bound to LUSI, some being man-made, leading to further vulnerabilities. Thus, the territorial resiliency is more complex under various stakeholders and scalar levels.

Keywords : magmatic volcanism - mud volcano - LUSI - disaster management - systemic resiliency