

# L'île de la Dominique, à l'origine des avalanches de débris les plus volumineuses de l'arc des Petites Antilles

Anne Le Friant<sup>a,b,\*</sup>, Georges Boudon<sup>a</sup>, Jean-Christophe Komorowski<sup>a</sup>, Christine Deplus<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Laboratoire de physique des géomatériaux, UMR-CNRS 7046, et Observatoires volcanologiques, Institut de physique du globe de Paris, case 89, 4, place Jussieu, 75252 Paris cedex 05, France

<sup>b</sup> Laboratoire de gravimétrie et géodynamique, UMR-CNRS 7096, Institut de physique du globe de Paris, case 89, 4, place Jussieu, 75252 Paris cedex 05, France

Reçu le 21 novembre 2001 ; accepté le 11 décembre 2001

Présenté par Claude Jaupart

---

**Abstract – The Island of Dominica, site for the generation of the most voluminous debris avalanches in the Lesser Antilles Arc.** Results from recent fieldwork and the Aguadomar marine survey in the Lesser Antilles clearly indicate that the volcanic field of southern Dominica has experienced three major edifice collapse events. This led to formation of the most voluminous debris avalanches known in the Caribbean Arc. Submarine hummocky morphology with plurikilometric megablocks is characteristic of debris avalanche deposits. We propose that steep slopes on the western Caribbean side of the island and intense hydrothermal alteration lead to recurrent large-scale edifice collapses. Therefore islands in the Lesser Antilles face a non-negligible risk from generation of tsunamis associated with potential future edifice collapse. **To cite this article:** A. Le Friant et al., C. R. Geoscience 334 (2002) 235–243. © 2002 Académie des sciences / Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS

Lesser Antilles / Dominica / flank-collapse / debris avalanches / tsunami risk

**Résumé –** Suite à la campagne océanographique Aguadomar au large des Petites Antilles, de récentes études à terre montrent que le massif volcanique du Sud de l'île de la Dominique a subi au moins trois déstabilisations de flanc successives vers l'ouest, produisant les avalanches de débris les plus volumineuses de l'Arc antillais. Des morphologies sous-marines en *hummocks* révèlent des mégablocs plurikilométriques. Les déstabilisations de flanc sont dues aux fortes pentes de la partie ouest de l'île et à l'intense hydrothermalisation qui affecte cette zone. Ces instabilités représentent un risque non négligeable à l'échelle de l'arc antillais par l'ampleur des tsunamis qu'elles peuvent générer. **Pour citer cet article :** A. Le Friant et al., C. R. Geoscience 334 (2002) 235–243. © 2002 Académie des sciences / Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS

Petites Antilles / Dominique / déstabilisation de flanc / avalanches de débris / risque tsunami

---

## Abridged version

### 1. Introduction

Volcano edifice collapse has been recognised as a major destructive process in the evolution of all types of volcanic constructs in different geodynamical settings. In the Lesser Antilles Arc, numerous horseshoe-shaped structures have been identified [4]. In most cases, and particularly for the largest events, subaerial exposures of

associated debris avalanche deposits are limited as most if not all of the material entered the sea. The Aguadomar cruise (French R/V *L'Atalante*, December 1998–January 1999) has shown evidence for several submarine debris-avalanche deposits from Montserrat to St. Lucia [6]. It confirmed the widespread occurrence of flank-collapse events on almost every active volcanic island in the Lesser Antilles. In this paper, we present a joint analysis of terrestrial data from recent fieldwork and marine data from the Aguadomar cruise. We show that at least three flank-

---

\* Correspondance et tirés à part.  
Adresse e-mail : lefriant@ipgp.jussieu.fr (A. Le Friant).

collapse events have recently affected volcanic centres of southern Dominica, producing the most voluminous deposits yet recognised in the Lesser Antilles Arc.

The Lesser Antilles Island Arc (850 km-long) results from the subduction of the Atlantic oceanic plate beneath the Caribbean plate [5]. Southern islands of the arc, from Dominica to Grenada, are bordered to the west by the deep Grenada Basin. The topography of the volcanic Island of Dominica (800 km<sup>2</sup>) is complex, with steep slopes on numerous volcanic complexes and deeply entrenched river valleys. The most recent volcanism is located in the south with the Plat-Pays volcano, which is the most important eruptive centre (Fig. 1). Morne-Patates [14] and Morne-Crabier lava domes were formed during the most recent magmatic eruptions in Dominica. They are located inside the horseshoe-shaped Soufrière structure, which was interpreted to be either of caldera collapse origin [13] or of gravitational edifice collapse origin [14, 17], although no debris-avalanche deposits were identified. Historically, activity in the area has been limited to intense and prolonged fumarolic emanations. Since the end of 1998, felt earthquakes swarms have occurred repeatedly in the area, without significant changes in the fumarolic field.

Interpretation of the Aguadomar survey data [6] (swath bathymetry and backscatter data, seismic reflection and 3.5 kHz profiles) revealed submarine debris-avalanche deposits, covering an area of 3500 km<sup>2</sup>. The characteristic hummocky morphology is typical of proximal areas (1100 km<sup>2</sup>) between the isobaths 1400 and 2700 m (Fig. 2). It consists of very numerous megablocks (up to 2.8 km in length and 240 m in height), some of which are aligned in the flow direction. A large chaotic blocky texture, recognised on 3.5 kHz (Fig. 3) and seismic reflection profiles (Fig. 4), extends in distal areas.

Recent fieldwork has allowed on land recognition of two semi-circular structures and thick and texturally diverse subaerial debris-avalanche deposits. Some debris-avalanche deposits have exceptional proximal cataclastic fragmentation textures (Figs. 5a and 5b). The correlation between the distribution field of the submarine deposits with the semi-circular structures and the debris-avalanche deposits on land provides robust evidence that the submarine deposits were emplaced as a result of a recurrent process of large-scale edifice collapse of volcanic centres in southern Dominica. We propose that at least three flank-collapse events occurred in the southern part of Dominica.

## 2. Plat-Pays event

Thick debris-avalanche deposits with a mixed-facies (avalanche blocks and matrix) and abundant hydrothermally altered material outcrop on the southwestern coast from Pointe Guignard to Soufrière village and in cliffs of the southern coast near Berekua (Fig. 1). They can be correlated with the extent of the submarine deposit on the western and southern parts. Based on recent fieldwork, we suggest that Morne-Éloi represents the relict of a much

larger semi-circular structure responsible for this oldest and most voluminous collapse. We indirectly date the event to be older than the scoria fall deposit dated at 28 000 years BP by Wadge [17], which belongs to a pyroclastic sequence deposited within post-avalanche erosional channels on Plat-Pays volcano. Assuming the sedimentation rate proposed by Reid [12], the submarine collapse deposits are at least 100 000 years old.

## 3. Soufrière event

The large Plat-Pays composite volcano was built inside this older collapse structure. It collapsed to form the large Soufrière structure (4.2 km × 2.5 km, vertical headwall of 900 m). This event probably involved part of the submarine flanks of southern Dominica (down to approximately –200 m), and is associated with the part of the debris-avalanche deposit rich in megablocks. Scotts Head is a proximal relict avalanche plurikilometric megablock, with a well-developed cataclastic fabric (Figs. 5a and 5b), which probably lies at the bottom of the flank-collapse structure (Figs. 6 and 7). The age of this flank-collapse event can be estimated between 6600 ± 50 and 2380 ± 75 yr BP on the basis of new <sup>14</sup>C dating respectively on pyroclastic flow deposits of Plat-Pays volcano and on pyroclastic fallout deposits that cover the megablock of Scotts Head (Fig. 1).

## 4. Morne-Rouge event

Another edifice was built inside the Soufrière structure. We believe the Morne-Rouge semi-circular structure (2 km × 1 km) was formed by a third flank-collapse event. The recent Morne-Patates (450 ± 90 years BP [14, 17] and Morne-Crabier andesite lava domes were built inside the Morne-Rouge structure, which is prolonged at sea by a deeply entrenched channel (Fig. 6). Associated submarine debris-avalanche deposits cannot be distinguished from the older submarine deposits identified.

Despite the limitations inherent to such calculation, our best approximation of the volume of the submarine Soufrière debris-avalanche deposit can be approximated at best by the volume of the megablock zone of the deposit (3.5 km<sup>3</sup>). This is compatible with the estimated volume of the correspondent structure on land (6–7 km<sup>3</sup>). However, only estimates of the volume of the on land collapse structures can be given for the Morne-Rouge event (< 1 km<sup>3</sup>) and the Plat-Pays event (18–20 km<sup>3</sup>) as their submarine deposits cannot be clearly distinguished.

We propose that the voluminous collapse events affecting the southern part of Dominica are favoured by structural asymmetry of the island with steep slopes (20%) and the presence of the deep Grenada Basin on the western side, in contrast to more stable shallow slopes (5%) on the Atlantic side. Active volcanoes in the Lesser Antilles are off-centred on the western side of the islands and successive reconstruction of edifices following slope collapse and within westward-facing horseshoe-shaped structures promotes westward migration of volcanic activity (Fig. 7). In addition, the prolonged intense hydrothermal alteration

that develops within and along structural weakness zones involved in the collapse process will promote accelerated mechanical instability of typically voluminous steep dome complexes. A similar setting occurs also elsewhere in the Caribbean [4].

Edifice collapse events in southern Dominica produced the most widespread voluminous debris avalanches in the Caribbean [6]. Even though the geologic record indicates that edifice collapses in the Lesser Antilles have become less voluminous in recent times, they remain recurrent highly devastating events (at least 30) events have been documented [4] that pose also a very significant tsunami

risk for nearby islands as well as for the entire Caribbean. The recent Morne-Patates and Crabier lava domes are built above the most recent listric collapse surface, where intense corrosive hydrothermal alteration is likely to be developing, as evidenced by the present surface fumarolic manifestations. In addition, they are bound by very steep submarine slopes. Recent relatively strong seismic swarms in the area further underline the undoubtedly limited mechanical stability of these domes such that a potential future collapse event must be considered in hazard zonation, as in the case of all volcanically active islands of the Lesser Antilles Arc [4].

## 1. Introduction

Les déstabilisations de flanc sont maintenant reconnues comme des événements majeurs rythmant l'histoire des volcans. Elles représentent un processus de destruction d'un édifice volcanique, différent des caldeiras d'effondrement créées lors de la vidange d'un réservoir magmatique. De nombreux événements ont maintenant été reconnus sur différents volcans dans des contextes géodynamiques variés [15]. En contexte insulaire, une partie des avalanches de débris s'épanche en mer ; les volumes mis en jeu sont parfois très importants, particulièrement sur les îles océaniques telles que Hawaï [11], les Canaries [8] ou la Réunion [9]. Des tsunamis plus ou moins dévastateurs peuvent être générés.

Dans l'arc des Petites Antilles, ce phénomène se confirme, puisque des structures en forme de fer à cheval ont été identifiées sur la plupart des îles et interprétées comme des cicatrices de déstabilisation de flanc [2, 3, 10, 14, 16–18]. Ces structures sont de tailles diverses, tandis que les volumes concernés varient du dixième à plusieurs dizaines de kilomètres cubes. Les dépôts d'avalanches de débris n'ont pas été systématiquement retrouvés à terre car, dans le cas des grandes déstabilisations, la majeure partie des avalanches – voire la totalité – s'est épanchée en mer. La campagne océanographique Aguadomar qui s'est déroulée de fin 1998 à début 1999 à bord du *N/O L'Atalante* a révélé l'existence de dépôts d'avalanche de débris au large des différentes îles de l'arc des Petites Antilles, de Montserrat à Sainte Lucie, et confirmé l'importance de ce phénomène de glissement sur les volcans de l'arc [6].

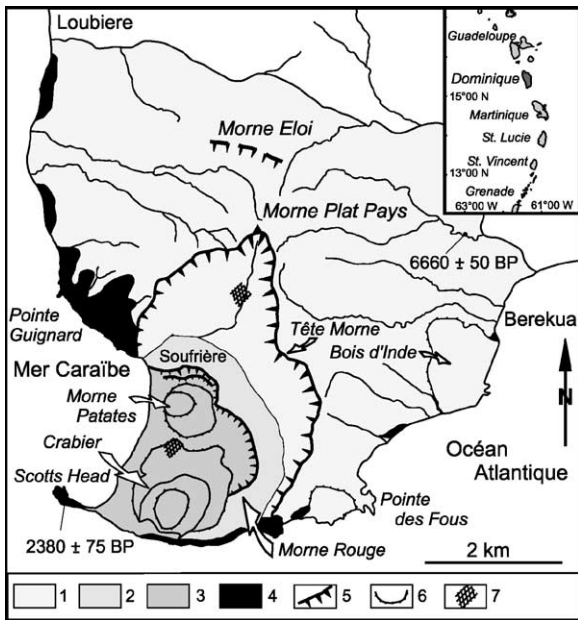
Dans la partie sud de l'île de la Dominique, Roobol et al. [14] ainsi que Wadge [17] avaient déjà interprété la structure de Soufrière comme la cicatrice d'une déstabilisation, bien qu'aucun dépôt d'avalanche de débris n'ait été reconnu. Les données de la campagne océanographique Aguadomar nous ont permis d'identifier d'importants dépôts d'avalanche de débris sur le

fond marin au sud-ouest de cette île [6]. L'objectif du présent article est de décrire la corrélation que nous avons pu établir entre les dépôts en mer et de nouvelles données acquises récemment à terre. Ceci nous permet de montrer qu'au moins trois déstabilisations de flanc successives ont affecté les volcans de la partie sud de l'île de la Dominique au cours de son histoire. Certaines de ces déstabilisations sont de grande ampleur et ont produit les avalanches de débris les plus volumineuses de tout l'arc des Petites Antilles.

## 2. Contexte géologique

L'arc insulaire des Petites Antilles résulte de la convergence de deux plaques, la plaque océanique Atlantique subductant sous la plaque Caraïbe [5]. Cet arc, à convexité vers l'est, s'étend sur 850 km, de la marge continentale sud-américaine (Venezuela) jusqu'au passage d'Anegada (limite avec les Grandes Antilles). Les îles de la partie sud de l'arc, de la Dominique à Grenade, sont bordées à l'ouest par le bassin arrière-arc de Grenade, dont la profondeur atteint 2900 m.

L'île de la Dominique est située par 15°20' de latitude nord et 61°30' de longitude ouest, entre les deux îles françaises de la Martinique et de la Guadeloupe. Cette île entièrement volcanique dont la superficie avoisine les 800 km<sup>2</sup>, possède un relief très accidenté. Les volcans les plus anciens sont situés à l'est et au nord-est [1]. Plusieurs dômes andésitiques récents forment la partie sud de l'île (Fig. 1). Morne-Plat-Pays est le centre éruptif le plus important de cette zone. Morne-Patates, le plus jeune dôme de la Dominique, dont la mise en place est datée à 450 ± 90 ans BP [14], est situé à l'extrême sud de l'île. Il est installé, ainsi que les dômes du Morne-Crabier, dans une dépression semi-circulaire (la structure de Soufrière), interprétée, soit comme une caldeira d'effondrement [13], soit comme une structure de glissement gravitaire [14, 17], bien qu'aucun dépôt d'avalanche de débris n'ait été reconnu.



**Figure 1.** Carte schématique de la partie sud de l'île de la Dominique résultant de cette étude. 1 : volcanisme de Plat-Pays ; 2 : formations volcaniques de Morne-Rouge ; 3 : volcanisme récent ; 4 : dépôts d'avalanche de débris ; 5 : structures de déstabilisation ; 6 : dômes ; 7 : champs fumerolliens.

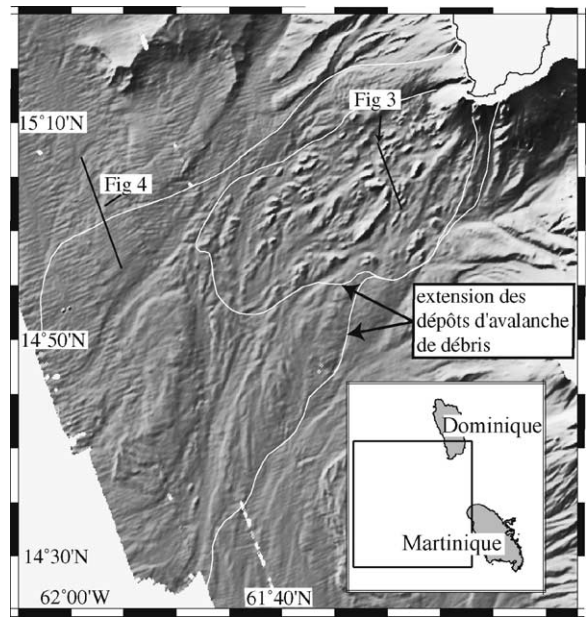
**Figure 1.** Simplified geological map of Southern Dominica resulting from this study. 1: Plat-Pays volcanic deposits; 2: Morne-Rouge volcanic products; 3: recent volcanism; 4: debris avalanche deposits; 5: flank-collapse structures; 6: lava domes; 7: fumarolic fields.

L'activité historique dans cette zone se traduit par l'existence d'un champ fumerollien actif très développé et de crises sismiques répétées, avec des séismes ressentis, dont la plus récente a débuté en octobre 1998.

### 3. Nouvelles données en mer

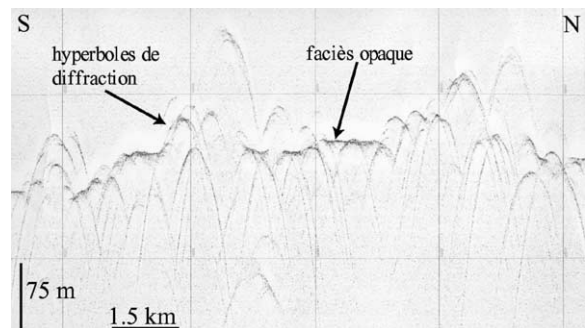
En mer, les données bathymétriques et géophysiques (imagerie, sondeur de sédiments 3,5 kHz, sismique réflexion, gravimétrie, magnétisme) acquises lors de la campagne Aguadomar ont permis d'identifier des dépôts d'avalanches de débris au sud-ouest de l'île de la Dominique [6]. Ces dépôts ont une morphologie caractéristique dans la zone proximale, de par la présence de nombreux mégablocs (blocs hectométriques à kilométriques). Dans les zones latérales et distales, les dépôts d'avalanche de débris ont été identifiés par l'analyse des données de sismique réflexion et de sondage 3,5 kHz. Les blocs doivent y être de plus petite taille, en dessous de la résolution de nos données de bathymétrie et d'imagerie.

La zone à morphologie en *hummocks*, qui révèle la présence de nombreux mégablocs, a une superficie avoisinant les 1000 km<sup>2</sup> (Fig. 2). Les mégablocs, dont certains sont allongés dans la direction de l'écou-



**Figure 2.** Bathymétrie multifaisceaux au sud-ouest de l'île de la Dominique (campagne Aguadomar), illumination N320°. Extension des dépôts d'avalanche de débris (zones avec et sans mégablocs) et localisation des profils des Figs. 3 et 4.

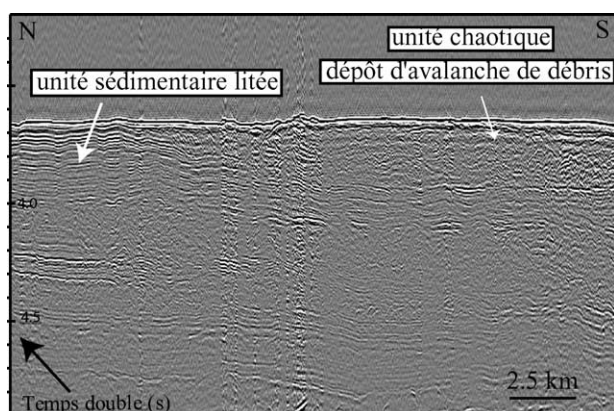
**Figure 2.** Swath bathymetry southwest of Dominica island (Aguadomar survey), illumination from N320°. Extension of debris avalanche deposits (areas with and without megablocks) and location of profiles shown in Figs. 3 and 4.



**Figure 3.** Profil du sondeur de sédiments 3,5 kHz recoupant l'avalanche de débris. Hyperboles de diffraction dues à la présence des mégablocs et faciès opaque correspondant à la matrice.

**Figure 3.** Record from 3.5 kHz echo sounder through the debris avalanche deposit. Diffraction hyperbolae reflect the presence of megablocks, whereas the opaque facies is characteristic of the matrix of the deposit.

ment, sont clairement observés sur les pentes du flanc sud-ouest de l'île, entre les isobathes 1400 et 2700 m. Ils sont bordés par de nombreux chenaux d'érosion et peuvent atteindre 2,8 km de long et 240 m de haut. Sur les profils de 3,5 kHz (Fig. 3), les mégablocs génèrent de nombreuses hyperboles. De part et d'autre, un faciès opaque correspond à la matrice du dépôt d'avalanche de débris. En assimilant chaque mégabloc à une forme géométrique simple, nous estimons le vo-



**Figure 4.** Profil de sismique réflexion (6 traces) recoupant la limite nord des dépôts d'avalanche de débris.

**Figure 4.** Seismic reflection (6 channels) profile through the northern limit of the debris avalanche deposits.

lume de l'ensemble de ces blocs à  $3,5 \pm 1 \text{ km}^3$ . Cependant, ne connaissant pas la base réelle des mégablocs, ennoyée dans les blocs plus petits et la matrice plus fine, ce volume est probablement sous-estimé.

La zone de dépôt dépourvue de mégablocs couvre une superficie supérieure à  $3500 \text{ km}^2$  (Fig. 2). Elle est clairement identifiée sur les profils de sismique réflexion, sur lesquels elle se traduit par la présence d'une unité diffractante caractéristique de dépôts chaotiques (Fig. 4). Cette dernière est localement surmontée par une unité litée de faible épaisseur, indiquant la présence de sédiments. Les épaisseurs maximales de ces deux unités dans les parties distales sont de 0,15 et 0,04 std (secondes temps double), correspondant respectivement à 140 et 40 m (vitesses utilisées de  $1800 \text{ m s}^{-1}$  pour l'avalanche et  $2000 \text{ m s}^{-1}$  pour les sédiments). Cette zone de dépôt est recoupée par deux grands chenaux d'érosion, drainant les produits du flanc ouest de l'île de la Dominique.

## 4. Nouvelles données à terre

De nouvelles données de terrain ont permis d'effectuer une cartographie de la partie sud de l'île et de reconnaître au moins deux structures de déstabilisation et plusieurs dépôts d'avalanche de débris.

### 4.1. Les structures

Les remparts de la structure de Soufrière, déjà reconnus par Roobol et al. [14] et Wadge, [17], sont parfaitement identifiables dans la topographie (Fig. 1). Cette structure, qui recoupe le volcan de Plat-Pays, est ouverte en direction du sud-ouest vers la mer Caraïbe. De forme allongée, elle s'étend à terre sur 4,2 km en nord-sud et sur 2,5 km en est-ouest. Les remparts qui atteignent la mer montrent un dénivelé maximum de

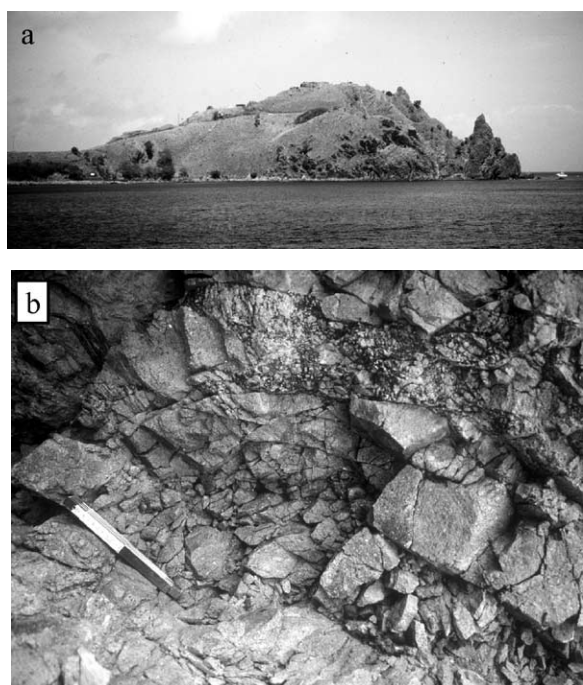
900 m au niveau du Morne-Plat-Pays. Ils présentent des parties très hydrothermalisées, avec un champ fumarolien très actif dans la zone la plus profonde de la structure. Ces remparts recoupent principalement des dépôts de nuées ardentes, dans lesquels s'intercalent quelques coulées de laves massives provenant de l'édification du volcan de Plat-Pays.

La ride de Morne-Rouge est une crête semi-circulaire, précédemment interprétée comme un bloc glissé depuis le rempart de la structure de Soufrière [14]. Wadge [17], quant à lui, suggérait que la ride s'était formée in situ et faisait partie intégrante d'un volcan de 3 km de diamètre, dont la morphologie aurait ensuite été modifiée par une explosion. Les pentes externes de la ride (pentes est) sont celles d'un édifice construit à l'intérieur de la structure précédente, constitué principalement de dépôts de nuées ardentes. Elles contrastent avec les pentes internes, beaucoup plus fortes. Nous proposons que cette crête semi-circulaire ouverte vers l'ouest soit la limite d'une petite structure de déstabilisation ( $2 \times 1 \text{ km}$ ) affectant l'édifice reconstruit.

### 4.2. Les dépôts d'avalanches de débris

Des dépôts d'avalanche de débris (faciès à blocs) ont été identifiés à l'ouverture de la structure de Soufrière, sur la côte sud de l'île. Ils sont constitués de mégablocs, comme celui qui forme la presqu'île de Scotts Head (Figs. 1 et 5a). Les deux mégablocs situés le plus à l'est sont très similaires. Ils affleurent sur un dénivelé de 80 à 100 m, mais leur taille est probablement plus importante, car ils sont nappés par des produits plus récents, tandis que leur base n'est pas visible. Ils sont constitués de laves massives très diaclasées, avec un début de fragmentation particulièrement visible entre les différentes lames et blocs. Cette fragmentation montre des structures de type *jigsaw cracks*, caractéristiques des avalanches de débris [7]. Le mégabloc de Scotts Head est également constitué de lave massive très fragmentée (Fig. 5b). Sa taille est de  $500 \times 300 \text{ m}$  pour 60 m de hauteur émergée. Il présente un taux de fragmentation beaucoup plus important que les mégablocs précédents, avec une gamme de textures extrêmement variée (fragmentation à échelle métrique et décimétrique, *jigsaw cracks*, pulvérisation entre les blocs alimentant la matrice, injection de la matrice entre les blocs, broyage entre blocs et vitrification de la zone cisailée).

D'autres dépôts d'avalanche de débris de grande ampleur (appelés dépôts de la Pointe Guignard) ont été reconnus sur la côte sud-ouest de l'île, au-delà du rempart nord de la structure de Soufrière (Fig. 1). Ces dépôts affleurent pratiquement en continu sur 4,5 km le long de la côte et sur une épaisseur proche de 100 m. Quelques mégablocs forment des reliefs et



**Figure 5. a.** Presqu'île de Scotts Head, interprétée comme un mégabloc de lave massive de l'avalanche de débris. **b.** Fragmentation de type *jigsaw cracks* dans le mégabloc de Scotts Head.

**Figure 5. a.** Scotts Head Peninsula interpreted as a massive fractured lava megablock of the debris avalanche deposit. **b.** Jigsaw fit fabric in the fractured Scotts Head megablock.

éperons, entre lesquels ont été canalisés des dépôts pyroclastiques plus récents. Les dépôts d'avalanche de débris sont caractérisés par des faciès très fragmentés de laves massives et de pyroclastites indurées, avec parfois une matrice jaunâtre à ocre, des passées hydrothermalisées et différents blocs emballés. Différents faciès montrent l'évolution de la fragmentation des laves massives, depuis des zones diaclasées jusqu'à des zones complètement cisailées et broyées. Le passage d'un faciès à l'autre peut se faire rapidement sur quelques mètres à quelques dizaines de mètres. Des dépôts similaires ont été reconnus sur la côte sud-est de l'île, à l'extérieur de la structure de Soufrière, jusqu'au village de Berekua. Ils sont fréquemment recouverts par des dépôts pyroclastiques ou recoupés par des dômes plus récents (par exemple, le dôme de Bois-d'Inde) (Fig. 1).

## 5. Les déstabilisations de flanc du sud de la Dominique

À partir de l'ensemble des données récentes acquises à terre et en mer (structures et extensions des dépôts d'avalanche de débris), nous proposons qu'au moins trois déstabilisations de flanc aient affecté la partie sud de l'île de la Dominique.

### 5.1. L'événement de Plat-Pays

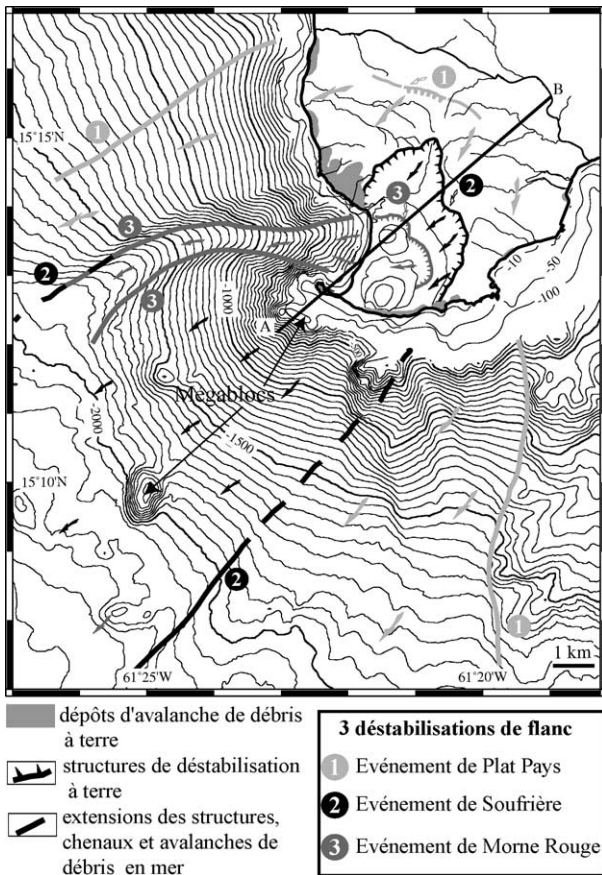
Au nord et au sud-est, l'extension des dépôts d'avalanche de débris de la pointe Guignard peut être corrélée avec celle des dépôts sous-marins. Les dépôts pyroclastiques associés au volcan de Plat-Pays, qui recouvrent les avalanches de débris à terre, ont probablement masqué les remparts de la structure de déstabilisation associée à cet événement. Néanmoins, l'escarpement de Morne-Éloi, peu marqué dans la topographie, est un bon candidat comme vestige de cette structure de déstabilisation (Fig. 1). Compte tenu de l'extension de l'avalanche de débris en mer, cette déstabilisation a très probablement détruit la majeure partie de l'édifice préexistant, ne laissant subsister que des remparts de faible hauteur. Le volcan de Plat-Pays s'est ensuite édifié à l'intérieur de la grande structure formée. Cet événement est antérieur à 28 000 ans, âge obtenu sur des bois carbonisés prélevés dans une séquence de dépôts pyroclastiques appartenant au volcan de Plat-Pays [17]. Sur la base de l'épaisseur des sédiments recouvrant les dépôts d'avalanche de débris en mer et en utilisant un taux de sédimentation de  $25 \text{ cm ka}^{-1}$  [12], nous estimons un âge minimum de 100 000 ans pour cet événement.

### 5.2. L'événement de Soufrière

Les dépôts d'avalanche de débris sur la côte sud de l'île sont situés à l'ouverture de la structure en fer à cheval de Soufrière et peuvent donc lui être associés. La taille importante des mégablocs ainsi que leur lithologie (principalement des laves massives) expliquent l'existence des morphologies en *hummocks* en mer. À terre, l'augmentation de la fragmentation des mégablocs d'est en ouest s'explique par la différence de distance parcourue par ces derniers. De la même façon, on peut expliquer l'absence de mégablocs dans la partie distale du dépôt d'avalanche de débris en mer.

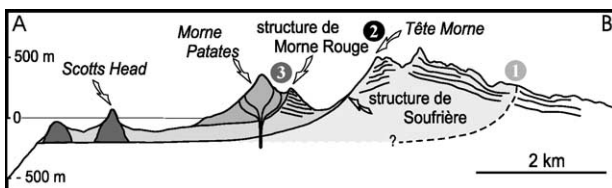
Le fait que les remparts atteignent la mer et la morphologie sous-marine au large de Scotts Head (Fig. 6) indiquent que la déstabilisation a probablement affecté la partie sous-marine de l'édifice. En effet, le replat observé à la profondeur d'environ 200 m, bordé par des fortes pentes, nous conduit à proposer que la base de la structure de glissement soit située à 200 m environ sous le niveau de la mer (Fig. 7). Scotts Head serait alors un mégabloc de 250 m de haut, posé sur le plancher de la structure. Un deuxième mégabloc non émergé et situé au sud-ouest de Scotts Head (Figs. 6 et 7) serait dans une situation comparable.

Il est difficile de distinguer les dépôts en mer associés à cet événement de ceux de l'événement précédent. Toutefois, les remparts de la structure de Soufrière se prolongent en mer par deux escarpements morphologiques qui encadrent la majeure partie de la



**Figure 6.** Carte interprétative des trois déstabilisations de flanc du sud de l'île de la Dominique. La bathymétrie provient du levé Aguadomar pour les profondeurs supérieures à 200–300 m (isobathes 50 m ; maîtresses 500 m), complétée à proximité de la côte par les isobathes de la carte marine de Dominique (publication SHOM, 1:60 000, France, 1998).

**Figure 6.** Interpretative map of the three flank-collapse events of southern Dominica. Bathymetry is from the Aguadomar cruise for depths > 200–300 m (isobaths 50 m, main isobath 500 m) and from the marine map of Dominica for isobaths immediately near the coast (edited by SHOM, 1:60 000, France, 1998).



**Figure 7.** Coupe interprétative recoupant les trois structures de déstabilisation (profil localisé sur la Fig. 6).

**Figure 7.** Interpretative cross-section through the successive flank-collapse structures (the profile is located in Fig. 6).

zone à mégablocs et permettent de limiter l'extension du dépôt dans la partie proximale (Fig. 6).

L'activité volcanique post-déstabilisation étant localisée à l'intérieur de la structure de Soufrière, la datation d'un bois carbonisé prélevé dans les dépôts pyroclastiques du volcan de Plat-Pays (Fig. 1) permet de

proposer un âge maximum de  $6600 \pm 50$  ans BP pour cette déstabilisation. L'âge minimum serait de  $2380 \pm 75$  ans BP à partir d'une datation obtenue sur des bois carbonisés prélevés dans une séquence de retombées aériennes recouvrant le mégabloc de Scotts Head.

### 5.3. L'événement de Morne-Rouge

La crête semi-circulaire de Morne-Rouge peut s'expliquer par la construction d'un nouvel édifice à l'intérieur de la structure de Soufrière, à son tour déstabilisé. Morne-Rouge serait le seul vestige de cet édifice reconstruit. C'est à l'intérieur de cette nouvelle structure de déstabilisation que se sont édifiés les dômes récents de Morne-Crabier et Morne-Patates. Elle débouche en mer, à l'ouest du village de Soufrière, sur un chenal étroit et à bords escarpés (Fig. 6). Les dépôts d'avalanches de débris associés à cet événement sont difficilement dissociables des dépôts précédents.

## 6. Estimation des volumes déstabilisés

Les volumes mis en jeu dans une déstabilisation de flanc peuvent être estimés à partir des volumes manquant dans les structures identifiées à terre ou à partir des volumes des dépôts d'avalanche de débris. Il est bien sûr difficile de déterminer la forme des édifices volcaniques successifs avant chaque déstabilisation. Toutefois, compte tenu de la géométrie des structures et de l'altitude des édifices actuels le long de l'arc des Antilles, on peut proposer une estimation grossière des volumes déstabilisés pour chaque événement :  $< 1 \text{ km}^3$  pour l'événement de Morne-Rouge, de l'ordre de 6 à  $7 \text{ km}^3$  pour celui de Soufrière (en tenant compte de la partie sous-marine déstabilisée) et de l'ordre de 18– $20 \text{ km}^3$  pour l'événement de Plat-Pays. L'estimation des volumes des dépôts d'avalanche de débris en mer est beaucoup plus difficile à estimer. L'unité chaotique, caractéristique des dépôts d'avalanche de débris sur les profils sismiques, contient également des sédiments incorporés lors de l'écoulement ainsi que la couche de sédiments perturbés, à la base de l'avalanche [6]. Son épaisseur est donc beaucoup trop importante pour qu'on puisse en déduire le volume glissé. On peut néanmoins proposer que les mégablocs identifiés sur le flanc sous-marin appartiennent à l'avalanche de débris provenant de la structure de Soufrière. Le volume de ces blocs a été estimé à  $3,5 \text{ km}^3$ . En considérant qu'un certain nombre de blocs ne sont pas pris en compte, car de taille plus petite, qu'une partie d'entre eux est restée à terre et que le volume de matrice n'est pas déterminé, ce volume est du même ordre de grandeur que celui proposé pour la structure de Soufrière ( $6\text{--}7 \text{ km}^3$ ).

## 7. Origine des déstabilisations de flanc du sud de la Dominique

Les déstabilisations de flanc sur l'île de la Dominique sont toutes orientées vers l'ouest et le sud-ouest, tandis que les avalanches de débris s'écoulent en grande partie en mer, atteignant rapidement le bassin de Grenade. Ce schéma se renouvelle sur tous les volcans actifs ou éteints de la partie sud de l'arc des petites Antilles, de la Dominique jusqu'à Grenade [4, 6]. L'existence du bassin arrière-arc de Grenade entraîne une dissymétrie est-ouest extrêmement bien marquée, avec des pentes aériennes et sous-marines beaucoup plus fortes à l'ouest (20 %) qu'à l'est (5 %). La plupart des volcans actifs sont localisés dans la partie ouest, entraînant un surcharge sur les fortes pentes de ces îles et favorisant leur instabilité. À cette dissymétrie s'ajoute l'activité hydrothermale qui affecte ces édifices et les fragilise en provoquant une importante altération des roches. Ceci est illustré par l'existence d'un champ fumerollien actif très étendu dans le rempart de la structure de Soufrière. Les déstabilisations répétitives peuvent s'expliquer par la localisation de l'activité éruptive à l'intérieur de la structure créée précédemment, ce qui induit une migration de l'activité vers l'ouest et accentue la dissymétrie déjà évoquée (Fig. 7).

## 8. Conclusions

La partie sud de la Dominique, sur laquelle est localisée une des activités volcaniques récentes de l'île, a connu au moins trois déstabilisations de flanc, conduisant à un ensemble d'édifices emboîtés. Dans la période de temps observable, il semble que les déstabilisations

sont de plus en plus petites et qu'elles affectent à chaque fois l'édifice reconstruit dans la structure formée précédemment. Il semble également qu'elles se sont formées à intervalles de temps de plus en plus rapprochés. La première déstabilisation est ancienne (plus de 100 000 ans), mais les deux dernières sont beaucoup plus récentes et se sont produites dans les derniers 6600 ans. Si le phénomène de déstabilisation est un phénomène courant et répétitif sur la plupart des volcans de l'arc antillais [6] – plus de 30 événements ayant déjà été identifiés [4] –, les avalanches produites dans la partie sud de la Dominique sont parmi les plus spectaculaires de l'arc [6]. Elles sont volumineuses (3500 km<sup>2</sup> couverts par les dépôts), mais surtout se caractérisent par une morphologie en *hummocks* très développée, avec de nombreux mégablocs de très grande taille. Ceci est probablement dû à la nature lavique des formations constituant les édifices volcaniques du Sud de la Dominique.

La mise en place d'avalanches volumineuses comme celles de la Dominique peut avoir des effets extrêmement dévastateurs. En effet, l'entrée en mer d'une masse importante de matériaux génère des tsunamis qui peuvent affecter les côtes de l'île et des îles avoisinantes.

Un des problèmes majeurs est celui de la stabilité de l'édifice actuel. Les dômes laviques de Morne-Crabier et Morne-Patates, installés à l'intérieur de la dernière structure de déstabilisation, sont bordés à l'ouest par de fortes pentes sous-marines. L'intense activité fumerollienne argilisant certaines parties du volcan et l'importante activité sismique tendent à fragiliser l'édifice. L'éventualité d'une nouvelle déstabilisation doit être prise en compte dans l'évaluation du risque volcanique sur cette île, comme sur la plupart des îles de l'arc des Petites Antilles.

**Remerciements.** Nous remercions le capitaine et l'équipage de *N/O L'Atalante*, ainsi que S. Carrette, C. Schillingford, D. Williams et le ministère de l'Agriculture, de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement de la Dominique. Nous remercions aussi J.-F. Lénat et W.A. Duffield pour leur lecture critique du manuscrit. Cette étude a été en partie menée dans le cadre d'un programme PNRN-Insu. Contribution IPG n° 1816.

## Références

- [1] H. Bellon, Reconnaissance chronologique des deux premières phases d'activité volcanique en Dominique (Petites Antilles), C. R. Acad. Sci. Paris, série II 306 (1988) 1487–1492.
- [2] G. Boudon, M.-P. Semet, P.-M. Vincent, Flank failure-directed blast eruption at Soufrière, Guadeloupe, French West Indies: a 3000-year-old Mt St. Helens?, *Geology* 12 (1984) 350–353.
- [3] G. Boudon, M.P. Semet, P.M. Vincent, Magma and hydrothermally driven sector collapses: the 3100 and 11 500 Y.B.P. eruptions of la Grande Découverte (la Soufrière) volcano, Guadeloupe, French West Indies, *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 33 (1987) 317–323.
- [4] G. Boudon, J.-C. Komorowski, M.-P. Semet, A. Le Friant, C. Deplus, Frequent volcanic flank-collapses in the Lesser Antilles

Arc: origin and hazards (abstract), in: AGU 99 Fall Meeting, EOS Trans. AGU 80-46, 1999, p. F1142.

[5] P. Bouysse, D. Westercamp, P. Andreieff, The Lesser Antilles Island Arc, in: J.C. Moore, A. Mascle et al. (Eds.), Proc. ODP, Sci. Results 110 (1990) 29–44.

[6] C. Deplus, A. Le Friant, G. Boudon, J.C. Komorowski, B. Villemant, C. Harford, J. Ségoufin, J.-L. Cheminée, Submarine evidence for large-scale debris avalanches in the Lesser Antilles Arc, *Earth Planet. Sci. Lett.* 192 (2001) 145–157.

[7] H. Glicken, Facies architecture of large volcanic debris avalanches, in: R.V. Fisher, G.A. Smith (Eds.), Sedimentation in volcanic settings, SEPM (Society for sedimentary Geology), Spec. Publ. 45 (1991) 99–106.



[8] Krastel, H.U. Schmincke, C.L. Jacobs, R. Rihm, T.M. Le Bas, B. Alibés, Submarine landslides around the Canary Islands, *J. Geophys. Res.* 106 (2001) 3977–3997.

[9] J.-F. Lénat, P. Vincent, P. Bachèlery, The offshore continuation of an active basaltic volcano: Piton de la Fournaise (Réunion Island, Indian Ocean). Structural and geomorphological interpretation from Seabeam mapping, *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 36 (1989) 1–36.

[10] G.S. Mattioli, P.E. Jansma, L. Jaramillo, A.L. Smith, Sector collapse in island arc volcanoes: a digital topographic and bathymetric investigation of the Qualibou Depression, St. Lucia, Lesser Antilles, *Caribbean J. Sci.* 31 (1995) 163–173.

[11] J.G. Moore, D.A. Clague, R.T. Holcomb, P.W. Lipman, W.R. Normark, M.E. Torresan, Prodigious submarine landslides on the Hawaiian ridge, *J. Geophys. Res.* 94 (1989) 17465–17484.

[12] R.P. Reid, S.N. Carey, D.R. Ross, Late Quaternary sedimentation in the Lesser Antilles Island Arc, *Geol. Soc. Am. Bull.* 108 (1996) 78–100.

[13] G.R. Robson, J.F. Tomblin, *Catalogue of Active Volcanoes of the World including Solfatara Fields, 20: West Indies*, International Association of Volcanology, Rome, 1966, 56 p.

[14] M.J. Roobol, J.V. Wright, A.L. Smith, Calderas or gravity-slide structures in the Lesser Antilles Island Arc?, *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 19 (1983) 121–134.

[15] L. Siebert, H. Glicken, T. Ui, Volcanic hazards from Bezymianny and Bandaï-San type eruptions, *Bull. Volcanol.* 49 (1987) 435–459.

[16] P.M. Vincent, J.-L. Bourdier, G. Boudon, The primitive volcano of Mount Pelée: its construction and partial destruction by flank collapse, *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 38 (1989) 1–15.

[17] G. Wadge, Morne-Patates volcano, southern Dominica, Lesser Antilles, *Geol. Mag.* 122 (3) (1985) 253–260.

[18] G. Wadge, M.C. Isaacs, Mapping the volcanic hazards from Soufrière Hills volcano, Montserrat, West Indies, using an image processor, *J. Geol. Soc., London* 145 (1988) 541–551.