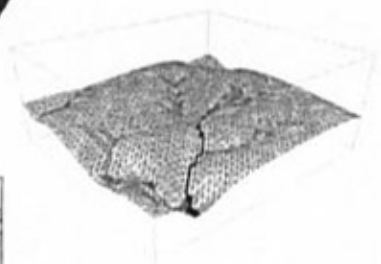


Geomorphology: from Expert Opinion to Modelling

**A tribute to Professor
Jean-Claude Flageollet**



Edited by D. Delahaye
F. Levoy and O. Maquaire

Strasbourg, France
April 26-27, 2002

Apports de différentes techniques à la compréhension de la corrosion sur les littoraux volcaniques hawaïens

G. Marie¹

1. Laboratoire Géolittomer-Brest, LETG – UMR 6554

Résumé : *L'utilisation de diverses techniques a permis d'isoler différents paramètres intervenant dans la morphogenèse des littoraux volcaniques. L'haloclastie apparaît comme un processus important. Contrôlée par le temps d'émerision, elle crée des formes d'alvéolisation particulièrement prononcées lorsque les facteurs pétrographiques sont favorables.*

Mots clés : *géomorphologie littorale, corrosion littorale, roches volcaniques, expérimentation, micro-erosion meter, taffoni, Hawaï*

[Abridged English version on last page]

1. Introduction à la morphodynamique des littoraux hawaïens

Les littoraux en roche volcanique restent peu étudiés, malgré la diversité des formes rencontrées. Pourtant, ce type de roche permet d'utiliser des jalons chronologiques pour l'évaluation des vitesses d'érosion. L'intérêt des deux îles parcourues, Hawaï et Oahu [Fig.1], est d'avoir sur leurs côtes des coulées de lave s'échelonnant du Pliocène à la période actuelle (éruptions du Pu'u 'O'o-Kupaiahana depuis 1983). Ainsi, une étude chronologique de l'évolution des formes a été possible sur le terrain.

Lorsque la coulée de lave atteint l'océan, elle forme un delta de lave [1]. Le front de la coulée recule rapidement par effondrements successifs, liés aux glissements de terrain dans le soubassement pyroclastique. La fissuration du matériel, le caractère explosif des rencontres eau/magma et les coups de boutoirs des vagues favorisent ce démantèlement [2]. Le recul de la falaise est ensuite plus lent, car seule l'attaque marine intervient et permet le façonnement d'une plate-forme à ses pieds, parfois infralittorale en raison des variations eustatiques et de la subsidence volcano-isostatique. Les processus restent à ce stade essentiellement d'origine mécanique (fissuration ou fragilisation par le choc des vagues, dépavage, évorsion, rainurage et possibles écroulements).

A plus long terme, les paquets de mer et les embruns projetés sur la partie supérieure de la falaise ou sur la haute plate-forme (sommet de la coulée) participent à la morphogenèse. On regroupe sous le terme de corrosion littorale l'ensemble des processus physico-chimiques et biologiques (dissolution, hydrolyse, oxydation, haloclastie et bio-érosion). C'est ce relais de processus, négligeable dans un premier temps mais, décisif sur le long terme, que nous nous attacherons à décrire dans cet article. Les roches effusives sont particulièrement sensibles à la corrosion littorale qui façonne des formes de tailles diverses (taffonis, lapiés, mares de corrosion...), dont certaines sont particulières aux littoraux en roche volcanique : rempart externe de certaines plates-formes, microformes différenciées dans les cellules de refroidissement ou les laves en coussins [3, 4, 5].

A cette approche naturaliste d'observation des formes et d'interprétation en terme de processus, nous avons adjoint diverses techniques ayant pour but de préciser les modalités d'action de la corrosion littorale sur les littoraux volcaniques et le rôle relatif des différents paramètres, qu'ils soient externes ou internes à la roche.



Fig. 1 - Localisation des sites étudiés

2. Les techniques utilisées

2.1 Les mesures morphométriques de taffonis

Les taffonis constituent des marqueurs efficaces de l'importance de la corrosion littorale, même si les processus exacts de genèse sont toujours discutés [6]. Sur les côtes hawaïennes, les formes d'alvéolisation, centimétriques à pluri-décimétriques (des nids d'abeilles aux taffonis *s.s.*), se trouvent sur la partie haute des falaises, mais également au niveau des fractures de tumulis et sur les blocs de tempête ou de tsunami. L'observation des formes sur le terrain a permis de dégager six stades majeurs d'évolution, avec des stades intermédiaires [Fig.2]. Pour mieux comprendre le rôle des conditions climatiques et pétrographiques dans l'individualisation de ces formes d'alvéolisation, neuf sites possédant des blocs taffonisés en haut de plate-forme ont été retenus. Sur chacun d'entre eux, 100 blocs, choisis de manière aléatoire, ont été examinés (stade d'évolution, taille et type de roche). Malgré les limites de la méthode (représentativité des blocs, subjectivité dans le choix du stade d'évolution et du faciès pétrographique) et le nombre réduit de sites étudiés, certaines relations ont pu néanmoins être observées.

2.2 Les mesures à l'aide du *micro-erosion meter*

Le *micro-erosion meter* est un instrument de mesure composé d'une sonde posée sur un plateau triangulaire, lui-même soutenu par trois pieds [7]. Ces pieds se calent sur trois vis inoxydables préalablement enfoncées dans la roche. Une jauge graduée indique la hauteur à laquelle se trouve la sonde par rapport à la surface rocheuse sub-horizontale. Cet outil a permis de calculer des taux d'érosion, principalement sur les littoraux calcaires, mais aucune publication ne concerne les côtes volcaniques.

Dix sites de mesure ont été choisis sur l'île d'Hawaï [Fig.1] afin de faire varier les conditions climatiques et marines, la pétrographie ou encore l'âge de la roche. Sur chaque site, une à quatre stations ont été mises en place de manière à former un profil longitudinal de la plate-forme, afin de comparer les taux dans les domaines intertidal et supralittoral. Les mesures ont été effectuées lors des printemps 2000 et 2001. Le taux d'érosion ainsi calculé a ensuite été converti en taux annuel.

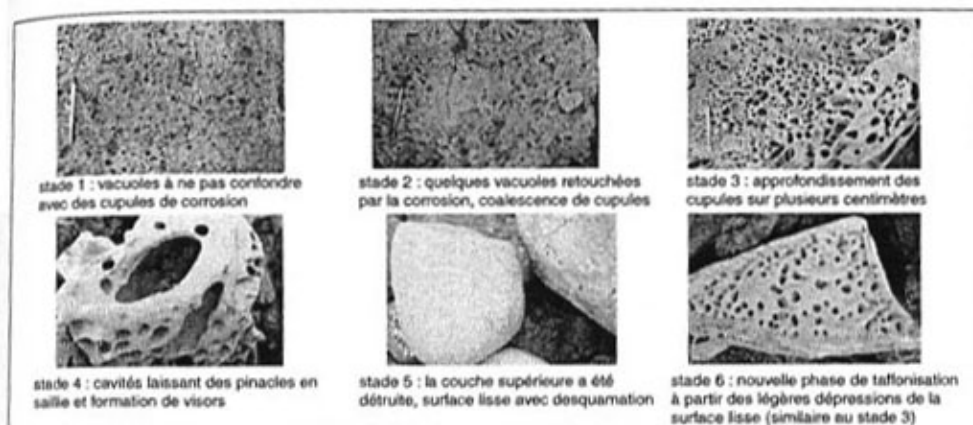


Fig. 2 - Les six stades d'évolution d'un taffoni en roche volcanique (photos prises à Noio Point)

Les processus mesurés ne sont pas tous liés à la corrosion littorale et ne sont pas forcément linéaire dans le temps, d'où une première limite de la méthode. Bien que la sensibilité de l'instrument soit de 0,01 mm, de nombreux paramètres diminuent également la précision des mesures (vis mal positionnées, état de la surface, conditions climatiques, méthode de mesure, difficultés de lecture, dérèglement de l'instrument...). Une estimation de la précision a été calculée en mesurant systématiquement plusieurs fois chacun des points. Les mesures les plus imprécises ont été écartées. Les résultats obtenus doivent donc être interprétés avec prudence en raison des limites de l'appareil et du court pas de temps pris en compte.

2.3 L'expérimentation sur la corrosion littorale

Une expérimentation de 120 jours en laboratoire a été menée sur 80 échantillons calibrés (3 x 3 x 1,5 cm) de cinq types de roche volcanique : basalte tholéiitique micro-vésiculeux (A) de l'année 2000 (avec ou sans croûte vitreuse), basalte tholéiitique macro-vésiculeux à croûte épaisse (B), basanite à néphélines (C) pré-altérée (avec ou sans surface tamponnée par l'eau de mer), basalte alcalin microlitique (D) et tufs palagonitiques (E). L'objectif était de modéliser les conditions environnementales pour tenter de mieux comprendre les mécanismes de corrosion sur ce type de roche. Pour cela, les échantillons ont été soumis à différents protocoles en faisant varier divers paramètres :

- durée d'immersion (permanente, deux tiers ou un tiers du temps, aspersion quotidiennes) ;
- nature du liquide d'immersion (eau de mer ou eau distillée) ;
- température lors de l'émersion (température ambiante ou 60°C).

Dix cycles de douze jours chacun (288 h) ont été programmés, avec changement de la solution à la fin du cycle et contrôle du temps d'immersion lorsque celui-ci était alterné. Pour limiter les risques de résultat non représentatif, deux échantillons de la même roche ont été soumis à chaque fois au même protocole. Les échantillons ont été pesés après un passage à l'étuve en début et en fin d'expérimentation, ainsi qu'à trois reprises au cours de l'expérience pour estimer le pourcentage de poids perdu par corrosion.

L'utilisation de méthodes, à la fois qualitatives et quantitatives, sur le terrain comme en laboratoire, a permis d'isoler différents paramètres agissant sur les processus associés à la corrosion littorale sur les côtes volcaniques.

3. Le rôle des agents environnementaux sur la corrosion littorale

3.1 Les conditions climatiques

La comparaison des mesures morphométriques [Fig.3] montre que l'abondance des pluies pourrait limiter la formation des taffonis sur la façade au vent (pourcentage marqué de stade 1). Le lien est moins net entre corrosion généralisée et précipitations (pourcentages globalement plus élevés de stade 5/6 sur la côte aride). Il semble que sur la côte orientale la pétrographie intervienne. Les mesures de micro-érosion ne présentent pas, quant à elles, de différence marquée entre côte au vent et côte sous le vent [Tableau 2].

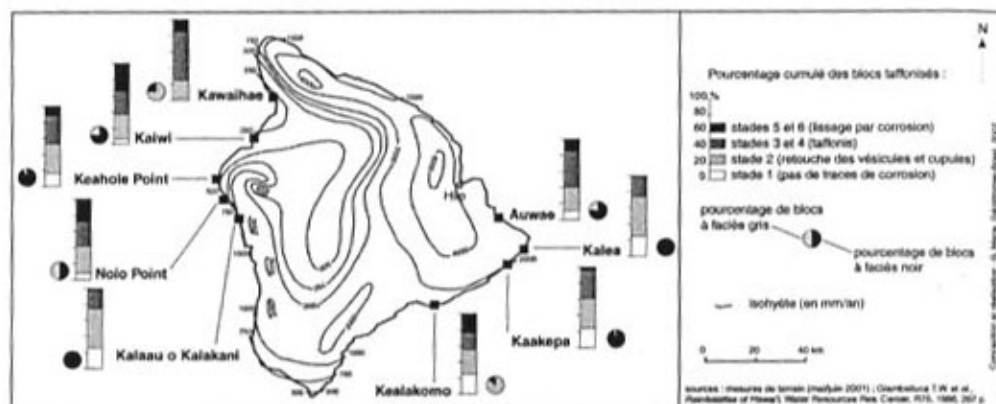


Fig. 3 - Morphométrie des taffonis sur les blocs de tempête

L'expérimentation *in vitro* montre que l'émersion à une température de 60°C, température atteinte sur la roche sombre des littoraux volcaniques, favorise généralement l'haloclastie ou la Salzsprengung [Tableau 1]. La cristallisation des sels est, en effet, plus marquée et rapide, favorisant la désagrégation granulaire et la desquamation. Les différences sont particulièrement nettes pour les roches les plus hétérogènes, parfois réduites en arènes (Ca, Cb, E).

Nom	Protocole Description	Erosion (pourcentage de poids perdu)							
		Basalte tholéitique				basanite à néphélines		b. alcalin	tufs palag.
		Aa (eau distillée) %	Aa (eau de mer) %	Ab (croûte) %	B (croûte) %	Ca %	Cb (surt. Temp.) %	D %	E %
P1	Immersion permanente à 10-29°C	-0,8514	-0,6739			-0,8330			
P2	1/3 du temps en émersion à 10-29°C	-1,1208	-0,7589	-0,4566	-0,0672	-0,7175	-1,0127	-0,1779	-2,5121
P3	2/3 du temps en émersion à 10-29°C	-1,0061	-0,9191	-0,6424	-0,0774	-0,8842	-0,8058	-0,3134	-2,3129
P4	2/3 du temps en émersion à 60°C			-1,1074	-0,0880	-58,25 *	-63,23 *	-0,1130	-40,55 *
P4bis	1/3 du temps en émersion à 60°C	-1,1191	-0,9481						
P5	Aspersions d'eau de mer à 10-29°C		-1,3382	-0,4126	-0,0421	-1,4790	-0,8518 %	-0,0854	-2,6719
P6	Aspersions d'eau de mer à 60°C		-1,1459	-2,0089	-0,0752	-32,87 *			

* en raison de l'émiettement de l'échantillon, seuls les plus gros blocs ont été retenus

Tableau 1 - Résultats de l'expérimentation sur la corrosion littorale

La position sur le littoral

Dans l'étage infralittoral, les processus chimiques agissent certainement avec l'érosion mécanique des vagues. Dans notre expérimentation, l'immersion en continue des échantillons (P1) provoque une corrosion légèrement inférieure à celle obtenue avec des séquences d'immersions alternées pour le basalte tholéitique (Aa), la différence correspondant à l'absence d'haloclastie. Par contre, pour la basanite à néphélines (Ca), la dissolution des feldspathoïdes compense l'absence de Salzsprengung. Au niveau de la zone méditerranéenne, les processus chimiques couplés à l'haloclastie dans la partie supérieure peuvent amouillir la roche et favoriser l'ablation mécanique. L'expérimentation ne montre pas de lien évident entre la corrosion et le temps d'émersion. Les différences entre les protocoles P2 et P3 sont minimes, même si, en général, l'émersion prolongée favorise la corrosion. Les exceptions pourraient s'expliquer par la disparité des échantillons (E, Cb ?) ou bien sûr l'absence d'haloclastie (Aa dans l'eau distillée). Une aspersion régulière de quelques millilitres d'eau de mer a été réalisée sur certains échantillons afin de modéliser l'haloclastie par les embruns (P5 et P6). Il semble que la corrosion soit en général plus importante que lors de périodes d'immersion prolongées, certaines roches y étant plus sensibles que d'autres.

Cette augmentation de la corrosion selon le temps d'émersion se confirme avec les mesures au M.E.M. [Tableau 2]. En dépit des faibles taux mesurés, parfois même positifs (accrétion), la corrosion est généralement plus élevée dans la partie supralittorale (*cf.* Kawaihae ou Puako). Les taux les plus importants ont été mesurés au niveau de lapiés profonds de plusieurs décimètres à Punalu'u. Dans l'étage médiolittoral, la corrosion peut être compensée par un développement algal ou la cristallisation de sels à marée basse.

Sites	roche	particularité	âge (BP sauf actuel)	préc. ² (mm/an)	nb. de mes.	Taux d'érosion (mm/an)				Moy. (mm/an)	Mini. (mm/an)
						1	2	3	4		
Laupahoehoe Pt.	basalte alcalin	couée aa	10-3,6 ka	3 300	15	0,08	-0,02	-0,15		-0,03	-0,84
Laikehi Point	basalte tholéitique		1,5-0,75 ka	3 400	18	0,60	0,36	0,17		0,38	-0,09
Honolulu Landing	basalte tholéitique	couée aa	0,75-0,4 ka	3 000	6	0,29	-0,09			0,10	-0,28
Highcastle	basalte tholéitique	delta de lave	1999-2000	1 650	3	-0,72				-0,72	-0,93
Wilipea	basalte tholéitique	delta de lave	1995	1 600	12	0,17	0,43			0,30	-0,34
Kaena Point	basalte tholéitique	delta de lave	1972	1 400	17	0,57	-0,02	0,06		0,20	-1,29
Punalu'u	basalte tholéitique	lapiés	5,0-3,0 ka	900	5	-0,97				-0,97	-2,06
Kashole Point	basalte alcalin	blocs trifonisés	(3,0-1,5 ka) ¹	400	9	0,00	0,04			0,02	-0,77
Puako	basalte tholéitique		5,0-3,0 ka	150	21	0,07	0,35	-0,14	-0,25	0,01	-0,80
Kawaihae	basalte alcalin	plate-forme en	0,78-0,40 Ma	200	20	0,20	-0,33	-0,22	-0,48	-0,21	-1,69

1: âge de la couée sous les blocs

2: estimation des précipitations

Les données indiquées en italique ont été obtenues

en excluant les mesures les moins précises

Sources: mesures de terrain (entre avril 2000 et juin 2001), G. Marie; Wolfe E.W. et Morris J., Geologic Map of the island of Hawaii, U.S.G.S., 1996; Giambelluca T.W. et al., Rainfall atlas of Hawaii, Division of Water and Land Development, Rep. R76, 267 p., 1996

N.B.: seules les valeurs négatives indiquent une érosion effective

□ station médiolittorale sur la plate-forme

■ station supralittorale (haut de plate-forme ou surface de couée)

précision des mesures: 0,01 à 0,20 mm (sauf valeurs avec ?)

Tableau 2 - Taux d'érosion annuels calculés à l'aide d'un micro-erosion meter

3.3 Conséquences sur l'efficacité des processus

Sans nier le rôle exercé par l'action mécanique des vagues, l'haloclastie semble être le processus clef de la morphogenèse des littoraux volcaniques. L'expérimentation a aussi montré que les processus chimiques avaient une action, même si elle semble inférieure dans

l'eau de mer par rapport à l'eau distillée. Les réactions chimiques sont peut-être facilitées dans une eau à pH acide (eau distillée) par rapport à une eau basique et chargée en sels.

4. Le rôle de la pétrographie sur la corrosion littorale

4.1 L'âge de la roche

Les mesures au *micro-erosion meter* sur les coulées récentes donnent des taux presque nuls ou variables, en raison de la mobilité de la première croûte très cassante (projections ou passage de piétons). Lorsqu'elle est fragmentée, les morceaux décimétriques peuvent être évacués par les déferlements, voire le vent. Les taux les plus importants et les formes de corrosion se trouvent donc sur des roches de plusieurs milliers d'années. Mais des blocs de tempête, sans doute préalablement corrodés, ont pu se déposer et être taffonisés sur des coulées récentes : de 1971 pour Kealakomo, 1859 pour Kaiwi et 1790 pour Kaakepa.

4.2 La lithologie

Aucune différence marquée n'a été détectée entre les taux d'érosion, calculés au MEM, de roches aussi distinctes que les basaltes, les tufs palagonitiques et le beachrock (sur Oahu). Par contre, il semble que les blocs de basalte à faciès gris (alcalin ?) soient plus sensibles à la taffonisation que ceux à faciès noir (tholéitique ?) sur la côte au vent (*cf.* fig. 3).

L'étude de lames-minces d'échantillons montre rarement une altération préférentielle de minéraux, en raison certainement du cours pas de temps. En ce qui concerne la basanite (roche C), les cristaux de néphéline sont très sensibles à la dissolution. On observe souvent sur leurs pourtours des argiles de néoformation. En milieu intertidal, ces feldspathoïdes ont ainsi été totalement dissous et ne subsiste qu'une roche désormais macro-poreuse et résistante. Il y a également plus d'olivines altérées en iddingsite après l'expérimentation, comme pour le basalte alcalin (D). A plus long terme, la dévitrification et l'altération prolongée des minéraux, avec dissolution complète des plagioclases, produisent des arènes à faciès "pain d'épice", comme celles taillées en falaises au nord de Kohala (nord d'Hawaï)

4.3 La texture de la roche

L'altération semble agir, dans un premier temps, à partir des vacuoles et des microfissures, comme cela a déjà été décrit ailleurs [5, 8]. On observe souvent, en effet, au microscope du verre altéré, parfois en sphérolites, sur le pourtour des cavités ou autour des baguettes de plagioclases et un remplissage de minéraux argileux dans les fissures après l'expérimentation (roches B et C, et de façon moins nette A et E). Il faut néanmoins rester prudent sur l'interprétation car les différences sont parfois ténues, d'autant plus que la texture peut légèrement varier au sein de la même roche. De plus, certains échantillons avaient déjà subi une altération avant l'expérimentation (surtout C et Aa). La présence de vacuoles favorise aussi l'haloclastie en piégeant l'eau de mer. Ainsi, le basalte très vacuolaire (Aa) est sensible à la Salzsprengung, de même que la basanite (C) lorsque l'émersion s'effectue dans l'étuve, contrairement aux roches microlitiques (E et surtout D).

La croûte vitreuse des coulées basaltiques, correspondant au refroidissement rapide de la lave, limite la corrosion car les processus sont confinés à la surface de la roche. Ainsi les échantillons Ab et B sont résistants, avec un lent écaillage, lié à la dissolution et à l'haloclastie le long des fissures. A long terme, lorsque cette couche protectrice centimétrique a été percée ou enlevée, la corrosion est ensuite plus rapide. L'évolution des

taffonis et lapiés de l'étage supralittoral s'explique de la même façon. L'observation au microscope montre que la partie résistante est souvent microlitique (taffonis de Kaena Point) ou vitreuse (taffonis de Noio Point, lapiés de Punalu'u), alors que la partie sous-jacente possède des minéraux mieux cristallisés et plus d'éléments fémiques (uniquement à Kaena Point et Noio Point). L'approfondissement des vacuoles (stade 3), puis leur élargissement par desquamation et désagrégation granulaire, permet d'atteindre la couche sous-jacente plus fragile. La couche résistante forme alors un encochement (stade 4). Lorsque celui-ci a été détruit, les parois sont érodées jusqu'à l'obtention d'une surface lisse (stade 5), correspondant sans doute à un niveau plus résistant (différenciation magmatique).

5. Conclusion

Cette étude a permis de tirer un certain nombre de conclusions concernant les dynamiques de la corrosion littorale et leurs conséquences morphologiques. Sans oublier le rôle joué par l'érosion mécanique, l'haloclastie apparaît comme l'un des processus fondamentaux de la morphogénèse des côtes volcaniques. Liée au temps d'émergence, elle explique la corrosion plus rapide que connaît l'étage supralittoral et la genèse de formes d'alvéolisation particulièrement remarquables lors de conditions optimales (faibles précipitations, présence d'une couche superficielle vitreuse ou microgrenue, peut-être basalte alcalin). Elle agit préférentiellement dans les zones de faiblesse de la roche (vacuoles, microfissures), de concert avec l'altération chimique qui, en outre, s'attaque à certains minéraux fragiles. Des examens complémentaires seront nécessaires pour mieux appréhender la spécificité de la corrosion littorale sur les roches volcaniques. Les résultats obtenus sont à replacer dans une approche globale de la compréhension de la morphodynamique des littoraux volcaniques, où les observations de terrain constituent la base à partir de laquelle la réflexion s'établit. Les deux approches, naturaliste et quantitative, sont nécessairement complémentaires.

Références

- [1] Mattox, T.N., Mangan, M.T. Littoral hydrovolcanic explosions : a case study of lava-seawater interaction at Kilauea Volcano. *J. of Volc. and Geoth. Res.*, 75 (1-2), 1-17 (1997)
- [2] Marie, G. Les deltas de lave du littoral hawaïen. 2 : la destruction des deltas de lave et les risques induits. *L.A.V.E.*, 95, 8 p. (2002, à paraître)
- [3] Wentworth, C.K. Marine bench-forming processes : water-level weathering. *Journ. Geomorphol.*, 52, 6-32 (1938)
- [4] Guilcher, A., Berthois L., Battistini R. Formes de corrosion littorale dans les roches volcaniques, particulièrement à Madagascar et au Cap Vert (Sénégal). *Cahiers Océanographiques*, 14(4), 208-240 (1962)
- [5] Pomel, R.S. *Morphologie volcanique et paléoclimatologie des îles Canaries, comparaison avec d'autres milieux volcaniques insulaires*. Thèse de doctorat, Université d'Aix-en-Provence, Aix, France (1986)
- [6] Rodriguez-Navarro, C., Doehne, E., Sebastian, E. Origins of honeycomb weathering : the role of salts and wind. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 111(8), 1250-1255 (1999)
- [7] Trudgill, S.T., Hight, C.J., Hanna F.K. Improvements to the micro-erosion meter (MEM). *Brit. Geomorphol. Res. Group Techn. Bull.*, 29, 3-17 (1981)
- [8] Macaire, J.J., Karrat, L., Perruchot, A., Cocirca C. Influence des textures pétrographiques et des macrofissurations des basaltes sur leur désagrégation par altération météorique. Exemple des épanchements de basaltes quaternaire du Moyen Atlas au Maroc. *C. R. Acad. Sci. Série II*, 311(10), 1213-1219 (1990)

Contribution of different technicals to the understanding of corrosion on hawaiian volcanic coasts

G. Marie

The volcanic coasts initially evolve by mechanic attack of the waves [1, 2]. Later, weathering operates, especially in the supralittoral stage, with sprays and splashes. The term of corrosion regroups different processes of physicochemical and biological origin, which shape particularly remarkable corrosion forms in volcanic rocks [3, 4]. The naturalistic approach of forms observation in the field has been completed by various technicals to improve comprehension of processes on hawaiian volcanic coasts [Fig.1].

Thanks to the tafonis observations, a typology of the evolution of these forms has been defined [Fig.2] : excavation (stage 3) then widening of the vesicles, genesis of an overhang (stage 4), destruction of this resistant layer, smoothing of the surface (stage 5). Then, morphometric measurements have been done on storm or tsunami deposits with tafonis, evaluating the evolution stage for each one [Fig.3]. The measurements taken by a micro-erosion meter [7] must be prudently analyse because of the apparatus limits and the short-time between the two measurements campaigns. While being aware of the lack of precision of some measurements, erosion rates have been calculated and interpreted [Table 2]. An experimentation of 120 days in laboratory has been done on 80 samples from five distinct rocks. It made possible to better understand the mechanisms of corrosion on volcanic rocks, varying in particular the duration and the temperature of emergence [Table 1].

In the light of the results obtained with theses methods, different remarks can be made. Haloclasty seems to be one of the fundamental processes of volcanic coast morphogenesis. We confirm that its efficacy depends of climatological and petrographical factors [5, 6, 8]. Bounded with the time of emergence, it explains faster corrosion of the supralittoral stage and the genesis of notable weathering forms as tafonis or lapies when the conditions are optimal (presence of a superficial glassy or microgranular layer, low precipitations, possibly alkalic basalt). Haloclasty acts preferentially in the weakness zones of the rock (vesicles, microscopic cracks), in connection with the chemical alteration, etching, which, moreover, attacks some fragile minerals (olivine, feldspathoids, glass surrounding plagioclases).