

COOPÉRATION SCIENTIFIQUE FRANCO-INDONESIENNE

Délégation aux Risques Majeurs (DRAEI)
Directorate General of Geology and Mineral Resources
et

Ministère des Affaires Étrangères, Univ. Paris-Sud, Inst. Géographique National
ORSTOM, GEMCO, Badan Meteorologi dan Geofisik
LIPI, BPP Teknologi, Universitas Gadjah Mada

ALÉA SISMIQUE ET PARAMÈTRES
DE LA DÉFORMATION ACTIVE ASSOCIÉS À
LA GRANDE FAILLE DE SUMATRA (INDONÉSIE)



Michel Sébrier, Olivier Bellier
Jacques Deverchère, Michel Kasser, Rémy Louat et Thierry Duquesnoy

LGDI-URA CNRS Géophysique et Géodynamique Interne, Univ. Paris Sud, Orsay

RAPPORT FINAL

NOVEMBRE 1993

COOPÉRATION SCIENTIFIQUE FRANCO-INDONESIENNE

Délégation aux Risques Majeurs (DRAEI)

Directorate General of Geology and Mineral Resources

et

Ministère des Affaires Étrangères

Université de Paris-Sud, Institut Géographique National

ORSTOM, GEMCO, Badan Meteorologi dan Geofisik

LIPI, BPP Teknologi, Universitas Gadjah Mada

ALEA SISMIQUE ET PARAMETRES DE LA DEFORMATION ACTIVE ASSOCIÉS A LA GRANDE FAILLE DE SUMATRA (INDONESIE)

Michel Sébrier ⁽¹⁾, Olivier Bellier ⁽¹⁾, Jacques Deverchère ⁽²⁾,

Michel Kasser ⁽³⁾, Rémy Louat ⁽⁴⁾ et Thierry Duquesnoy ⁽⁵⁾

(1) LGDI - URA CNRS Géophysique et Géodynamique Interne / Univ. Paris Sud - Orsay

(2) GEMCO, Univ. Paris VI, Villefranche-sur-Mer

(3) ESGT - Conservatoire National des Arts et Métiers

(4) ORSTOM, UR1F

(5) LOEMI- Institut Géographique National

RAPPORT FINAL

NOVEMBRE 1993

Photo de couverture : scène SPOT 2 (270-352 du 26 mai 1990) montrant le relai des lac Dibawa et Diatas entre les segments de Muaralabuh (au Sud) et Singkarak (au Nord), latitude 1°S - longitude 100°49'E

REMERCIEMENTS

Ce projet de recherche rentre dans le cadre d'un accord de coopération scientifique entre la France et l'Indonésie. Il s'intègre dans le programme de coopération sur la sismotectonique de Sumatra qui a été signé en Juillet 1987 entre le Direktorat Jendral Geologi dan Sumber Daya Mineral, Indonésie, et la Délégation aux Risques Majeurs, France; contrat qui fut prorogé en Juin 1991.

Les travaux présentés dans ce rapport ont été financés par le Secrétariat d'État auprès du Premier Ministre Chargé de l'Environnement et de la Prévention des Risques Technologiques et Naturels Majeurs, Délégation aux Risques Majeurs (DRAEI), France.

Les images ont pu être acquises grâce aux programmes PNTS (Programme National de Télédétection Spatiale) et ISIS financés par de nombreux organismes dont le CNES, l'INSU (CNRS), l'IFREMER, le BRGM, l'ORSTOM, l'IGN, le Ministère de l'Environnement... Une partie des traitements d'images ont été effectués à l'Institut d'Astrophysique Spatiale par Emmanuel Barrier et Olivier Forni.

Nous tenons à remercier le Direktorat Jendral Geologi dan Sumber Daya Mineral (Jakarta), pour les facilités administratives et pour son aide logistique, technique et administrative lors des missions.

Nous remercions aussi:

- le Ministère des Affaires Étrangères, Direction de la Coopération Scientifique et Technique et du Développement, Service Culturel de l'Ambassade de France à Jakarta qui a permis, entre autre, la venue dans notre laboratoire de Mr. Subagyo Pramumijoyo; nous remercions plus particulièrement Mr. Marc Pain son aide fut précieuse au cours des différentes missions de ce programme;

- l'INSU / Centre National de Recherche Scientifique français qui a mis son parc de récepteurs GPS à notre disposition;

- l'Institut Géographique National pour son soutien logistique au cours de la mission de Géodésie;
- le Badan Meteorologi dan Geofisik, Jakarta pour l'accueil des seismologues de ce programme et pour l'accès aux données des réseaux sismologiques indonésiens;
- PKA-BPP Teknologi, Jakarta;
- Puslitbang Geoteknologi-LIPI, Bandung;
- Jurusan Teknik Geologi, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta;

Nous sommes également redevables envers les personnes suivantes pour leur aide précieuse:

- Mademoiselle Chevrier et Monsieur Deneufbourg (DRM);
- Mademoiselle Lefeuvre, Mme Laude et Mme Tanguy (CEPHYTEN);
- Monsieur J.L. Mercier (CNRS -URA. Géophysique et Géodynamique Interne, Orsay);
- Monsieur J.C. Ruegg (Institut de Physique du Globe de Paris);
- Dr Adjat Sudradjat (DGGMR);
- Dr Irwan Bahar (GRDC-DGGMR);
- Dr Wimpy (VSI-DGGMR);
- Dr R. Soetardjo (BMG);
- Dr Prih Hariadi (BMG)
- Dr Hery Harjono (RDCG-LIPI);
- Dr Subagyo Pramumijoyo (Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta);
- Prof. M.T. Zen (BPPT).

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS	p 2
SOMMAIRE	p 4
RÉSUMÉ	p 7
INTRODUCTION GÉNÉRALE	p 10
PRÉSENTATION GÉNÉRALE.....	p 16
I - CADRE GÉODYNAMIQUE DE LA GRANDE FAILLE DE SUMATRA	
II - HISTOIRE SISMIQUE DE LA GRANDE FAILLE DE SUMATRA	p 17
III - VITESSE DE DÉPLACEMENT LE LONG DE LA GRANDE FAILLE DE SUMATRA.....	p 17
IV - AUTRES RÉSULTATS DÉJÀ OBTENUS DANS LE CADRE DE CE PROGRAMME.....	p 18
<i>Les premiers résultats des campagnes en mer</i> <i>La campagne Sumenta II sur le N/O indonésien Baruna Jaya III.</i> <i>Exploitation des profils sismiques de la mission Sumenta II.</i>	
PREMIÈRE PARTIE : PARAMETRES DE L'ALEA SISMIQUE ASSOCIÉ A LA GRANDE FAILLE DE SUMATRA : GÉOMÉTRIE, SEGMENTATION ET VITESSE DE LA DÉFORMATION ACTIVE	p 21
1 INTRODUCTION	p 22
<i>Néotectonique et télédétection de l'arc de Sumatra : objectifs et résultats</i>	<i>p 25</i>
2 ANALYSE DE DOCUMENTS SATELLITAIRES COUVRANT LA PARTIE SEPTENTRIONALE DE SUMATRA : LA RÉGION DE TOBA - VITESSE DE DÉFORMATION HORIZONTALE DE LA GRANDE FAILLE DE SUMATRA ET CONTRÔLE STRUCTURALE DE LA CALDEIRA DE TOBA	p 27
I - INTRODUCTION	p 27
II - CINÉMATIQUE ET VITESSE DE DÉPLACEMENT DE LA GRANDE FAILLE DE SUMATRA	p 29
III - LA CALDEIRA DE TOBA	p 29
IV - ANALYSE STRUCTURALE DE LA CALDEIRA DE TOBA	p 30
V - RELATIONS ENTRE LA GRANDE FAILLE DE SUMATRA ET LA CALDEIRA DE TOBA	p 33
VI - CONCLUSIONS ET DISCUSSION	p 33
3 ANALYSE DES DOCUMENTS SATELLITAIRES EN VUE D'ESTIMER LES VITESSES DE DÉPLACEMENT DE LA GRANDE FAILLE DE SUMATRA : SYNTHÈSE DES RÉSULTATS.....	p 37
I - OBJECTIF DE L'ANALYSE	p 37
II - INTRODUCTION	p 37
III - MÉTHODE UTILISÉE	p 38
IV - CALCUL DU PARAMÈTRE " a "	p 39
V - CALCUL DES VITESSES LE LONG DE LA GRANDE FAILLE DE SUMATRA SUMATRA.....	p 44
Va - Calcul des vitesses de déformation au centre, région du lac de Singkarak (image SPOT 269-351)	p 44
Vb - Calcul des vitesses de déformation au Sud, caldeira de Ranau (image SPOT 278-360)	p 44
VI - CONCLUSIONS	p 50

4 CONCLUSIONS SUR LES VITESSES DE DEFORMATION ET L'ALEA SISMIQUE LE LONG DE LA GRANDE FAILLE DE SUMATRA	p 53
---	------

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES DE LA PREMIÈRE PARTIE.....	p 61
--	------

DEUXIÈME PARTIE : ETUDE GÉODESIQUE DE LA PARTIE CENTRALE ET MÉRIDIIONALE DE SUMATRA	p 64
--	-------------

1 - CADRE GEODYNAMIQUE DE LA GRANDE FAILLE DE SUMATRA.....	p 65
1-a : <i>Cadre géodynamique général</i>	p 65
1-b : <i>La Grande faille de Sumatra</i>	p 66
1-c : <i>Objectif de l'analyse géodésique</i>	p 70

2 - METHODOLOGIE DES MESURES GEODESIQUES.....	p 70
2-a : <i>La géodésie classique ou terrestre</i>	p 71
2-a.1 : <i>Le principe de la géodésie terrestre : la triangulation et la trilatération</i>	p 71
2-a . 2 : <i>Les inconvénients de la géodésie terrestre</i>	p 71
2-a . 3 : <i>La précision de la géodésie terrestre</i>	p 71
2-a . 4 : <i>Les mesures de géodésie classique à Sumatra</i>	p 72
2-b : <i>La géodésie spatiale : Le système de positionnement GPS</i>	p 72
2-b.1 : <i>Le principe du système de positionnement GPS</i>	p 72
2-b . 2 : <i>Inconvénients et avantages de la géodésie spatiale</i>	p 74
2-b. 3 : <i>La précision du GPS</i>	p 74
2-b . 4 : <i>Le déroulement des mesures GPS à Sumatra</i>	p 75

3 - DEROULEMENT ET ORGANISATION DU PROGRAMME GEODESIQUE.....	p 75
3-a : <i>Equipements utilisés</i>	p 75
3-b : <i>Installation des points</i>	p 76
3-c : <i>Observations météorologiques</i>	p 77
3-d : <i>Les rattachements</i>	p 77
3-e : <i>Organisation sur le terrain</i>	p 77

4 - LES RESEAUX GEODESIQUES.....	p 79
4-a : <i>Sélection des Sites</i>	p 79
4-b : <i>Le réseau de Ranau</i>	p 80
4-b.1 : <i>Intérêt du réseau</i>	p 80
4-b.2 : <i>Disposition du réseau</i>	p 80
4-b.3 : <i>Mesures du réseau</i>	p 80
4-c : <i>Le réseau de Singkarak</i>	p 80
4-c. 1 : <i>Intérêt du réseau</i>	p 80
4-c.2 : <i>Disposition du réseau</i>	p 80
4-c.3 : <i>Mesures du réseau</i>	p 81

V - LE DEPOULLEMENT DES DONNEES ET LES TRAITEMENTS	p 81
5-a : <i>Le déroulement des calculs</i>	p 81
5-b : <i>Les résultats des calculs</i>	p 90

6 - CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	p 90
6-a : <i>Perspective : la campagne de réitération des mesures</i>	p 90
6-b : <i>Période pour la campagne de réitération des mesures</i>	p 90
6-c : <i>Prospectives et extension du réseau</i>	p 91

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES DE LA DEUXIÈME PARTIE.....	p 94
--	------

ANNEXES A LA DEUXIEME PARTIE.....	p 96
ANNEXE I : RESULTATS DES CALCULS ET DES COMPENSATIONS.....	p 97
ANNEXE II : LISTE DES PARTICIPANTS AU PROJET DE GEODESIE.....	p 104
TROISIEME PARTIE : EVALUATION DU RISQUE SISMIQUE DE LIE A LA GRANDE FAILLE DE SUMATRA.....	p 106
1 - INTRODUCTION.....	p 107
2- SISMICITE HISTORIQUE.....	p 107
A) <i>Interprétation des données historiques et limites.....</i>	<i>p 107</i>
B) <i>Chronologies des grandes ruptures (intensité≥VIII).....</i>	<i>p 108</i>
C) <i>Bilan par zones et premières conclusions.....</i>	<i>p 110</i>
3 - SISMICITE INSTRUMENTALE.....	p 111
A) <i>Le réseau mondial.....</i>	<i>p 111</i>
1. <i>Un problème majeur: la mauvaise qualité des localisations.....</i>	<i>p 111</i>
2. <i>Les grands apports du réseau mondial.....</i>	<i>p 111</i>
B) <i>Le réseau régional: l'étude des écarts S-P.....</i>	<i>p 111</i>
1. <i>Présentation des stations du réseau permanent.....</i>	<i>p 111</i>
2. <i>Principe de l'analyse.....</i>	<i>p 113</i>
3. <i>Résultats préliminaires par station.....</i>	<i>p 114</i>
4. <i>Conclusions préliminaires.....</i>	<i>p 115</i>
C) <i>Le réseau régional: l'étude de crises et répliques.....</i>	<i>p 116</i>
1. <i>Les ruptures principales et leurs répliques.....</i>	<i>p 116</i>
2. <i>L'activité anormale au Sud de Bengkulu.....</i>	<i>p 118</i>
D) <i>Le réseau régional télémétré de Medan.....</i>	<i>p 119</i>
4 - CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES.....	p 119
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES DE LA TROISIÈME PARTIE.....	p 121
ANNEXES A LA DEUXIÈME PARTIE.....	p 122
ANNEXE I : Nombres de séismes par populations suivant les différences de S-P aux stations analogiques de Sumatra.....	p 122
ANNEXE II : Crise sismique du 15/12/1979 enregistrée aux stations de PPI et KSI..	p 130
CONCLUSIONS GÉNÉRALES ET PERSPECTIVES.....	p 135

RÉSUMÉ

La Grande Faille de Sumatra, d'orientation NW-SE, est une des structures majeures du SE asiatique (Figure 1). Elle est parallèle à la fosse de Sumatra qui marque la subduction de la plaque indo-australienne sous la plaque eurasiatique. La direction de la convergence environ NS, est normale à la fosse au niveau de Java, tandis qu'elle est oblique au large de Sumatra. Le mouvement décrochant dextre de la Grande Faille de Sumatra accommoderait la composante oblique de la convergence entre la plaque indo-australienne et la plaque eurasiatique au niveau de Sumatra (Fitch, 1972; Jarrard, 1986a et 1986b). La Grande Faille de Sumatra s'étend sur 1650 km, le long de l'arc volcanique de l'île de Sumatra. Elle relie les domaines en extension du bassin de la mer d'Andaman, au NW, et du détroit de la Sonde, au SE.

Dans le but de minimiser ou de prévenir les risques sismiques le long de la faille, il convient d'estimer les paramètres essentiels de l'aléa sismique le long de la Grande faille de Sumatra, c'est-à-dire la vitesse de déplacement la faille, la magnitude maximum et l'intervalle de récurrence. Ce rapport final nous permet de faire le point sur les principaux résultats obtenus en néotectonique (Première Partie), géodésie (Deuxième Partie) et sismologie (Deuxième Partie).

Les études néotectoniques ont été réalisées essentiellement à partir d'images satellitaires SPOT panchromatiques d'une résolution de 10 m. L'observation du décalage du réseau hydrographique le long de la Grande Faille de Sumatra, nous a permis de déduire, grâce au rejet apparent et à la longueur des rivières, les vitesses de décrochement le long de la faille, du Nord au Sud de Sumatra. Le mouvement décrochant dextre de la Grande Faille de Sumatra a pu être confirmé grâce à de nombreux marqueurs morphologiques décalés. Sur les images SPOT de la région du lac Toba, le décalage du réseau hydrographique permet d'évaluer une vitesse de déplacement dextre le long de la Grande Faille de Sumatra de l'ordre de 23 ± 2 mm/an depuis l'émission des tufs de Toba. Cette vitesse est supérieure à celle que nous avons estimée au Sud de Sumatra qui est de l'ordre de 9 ± 1 mm/an. Cette variation de la vitesse de déplacement le long de la Grande Faille de Sumatra s'expliquerait par la déformation de l'avant-arc: soit par un étirement longitudinal de celui-ci (McCaffrey, 1991), soit par un transfert du mouvement dextre vers la faille de Mentawai (Diament et al., 1991; 1992). Cette dernière, orientée NW-SE, constitue la limite occidentale du bassin d'avant-arc. Nous pensons qu'il faut chercher un modèle associant ces deux types de déformation de l'avant-arc pour expliquer cette variation de la vitesse de décrochement le long de la Grande Faille de Sumatra.

Les études néotectoniques ont aussi montré que la Grande Faille de Sumatra est caractérisée par des segments qui forment généralement des relais extensifs dextres. Ces relais

correspondent à des dépressions bordées par des failles décrochantes dextres ou normales dans lesquels se sont localisés notamment des grandes caldeiras de formes géométriques particulières (elliptiques à rectangulaires), comme la caldeira de Toba, la plus grande du monde. A Sumatra, l'analyse cinématique des plans de failles récentes montrent que de part et d'autre de la Grande Faille de Sumatra, la compression est orientée NNE à NE-SW. En revanche, le long de la zone de faille, on observe fréquemment des failles normales qui indiquent une extension E-W à NW-SE ("pull-apart" grabens ou relais). Concernant l'aléa sismique, l'analyse des cartes topographiques disponibles, des images satellites et un contrôle de terrain, nous ont permis de préciser la segmentation de la Grande Faille de Sumatra entre le Nord du lac Toba (3°N) et le détroit de la Sonde (6°S). La grande majorité des segments ont une longueur moyenne qui est de 80 ± 10 km, quelques rares segments ont cependant des longueurs qui peuvent atteindre 130-150 km. Nous avons donc calculés, en passant par le moment sismique, deux estimations de magnitudes maximums : $M_{wmax}=7,4-7,5$ pour 80 km et $M_{wmax}=7,6-7,7$ pour 150 km. Compte tenu des vitesses calculées près des lacs Toba (23 ± 2 mm/a) et Ranau (9 ± 1 mm/a), nous avons pu estimer les ordres de grandeur des intervalles de récurrence respectivement à 400 ± 200 ans (vers 5°S) et à 160 ± 80 ans (vers 2°N). Pour la partie centrale de la Grande Faille de Sumatra (région de Padang), l'intervalle de récurrence serait de l'ordre de 200 ± 100 ans. Ces estimations sont en accords avec les données de la sismicité historique et instrumentale qui signalent plus de tremblements de terre dans la région située au Sud du lac Toba que dans le Sud de Sumatra.

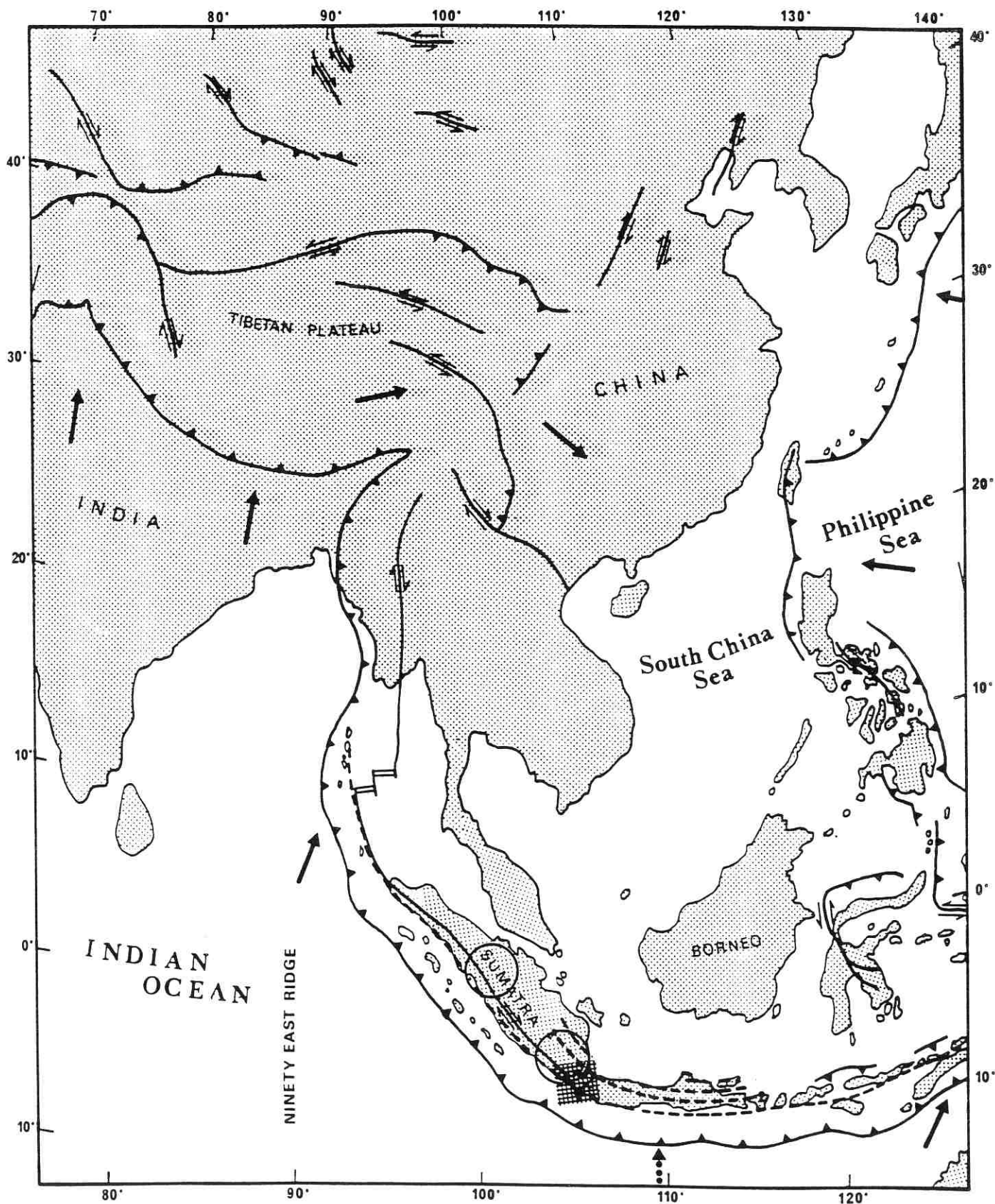
Deux réseaux géodésiques situés dans les parties centrale et méridionale de l'île de Sumatra et constitués respectivement de 12 et 9 stations (les réseaux de Singkarak et Ranau) furent déterminés par l'intermédiaire de mesures de distances par télémétrie laser et de mesures GPS. Cette première campagne de mesures s'est déroulée en Juillet-Août 1991 le long du système actif de la Grande Faille de Sumatra. Les points GPS sont actuellement localisés avec une précision d'un centimètre qui sera nettement améliorée lors de la remesure. Ce réseau permettra, lors de la réitération des mesures au cours d'une campagne future (en 1995), de localiser et d'estimer l'importance relative des déplacements horizontaux sur chacun des segments actifs de la faille.

Les études sismologiques ont permis de déterminer le long de la Grande Faille de Sumatra la présence de nids d'activité microsismique, plus ou moins permanents, qui n'étaient pas clairement prouvés jusqu'à ce jour. De plus, l'analyse de la sismicité historique et instrumentale (réseau permanent analogique) de l'île de Sumatra montre que cette Grande Faille de Sumatra présente de grandes ruptures, au moins sur certains tronçons comme Singkarak, le sud du lac Toba... L'analyse en cours, des données des réseaux régionaux, devrait préciser la localisation des épencentres dans la région du lac Toba et en particulier le rôle possible des "pull-aparts" comme aspérités entre des segments actifs.

FIGURE 1

Cadre tectonique du SE de l'Asie; les flèches indiquent la direction de convergence de la plaque Indo-Australienne.

La zone hachurée marque la région de l'étude néotectonique développée entre 1987 et 1990 (cf. rapport DRM, Sébrier et al., 1989) et les cercles délimitent approximativement les régions de l'analyse de géodésie menée en 1991.



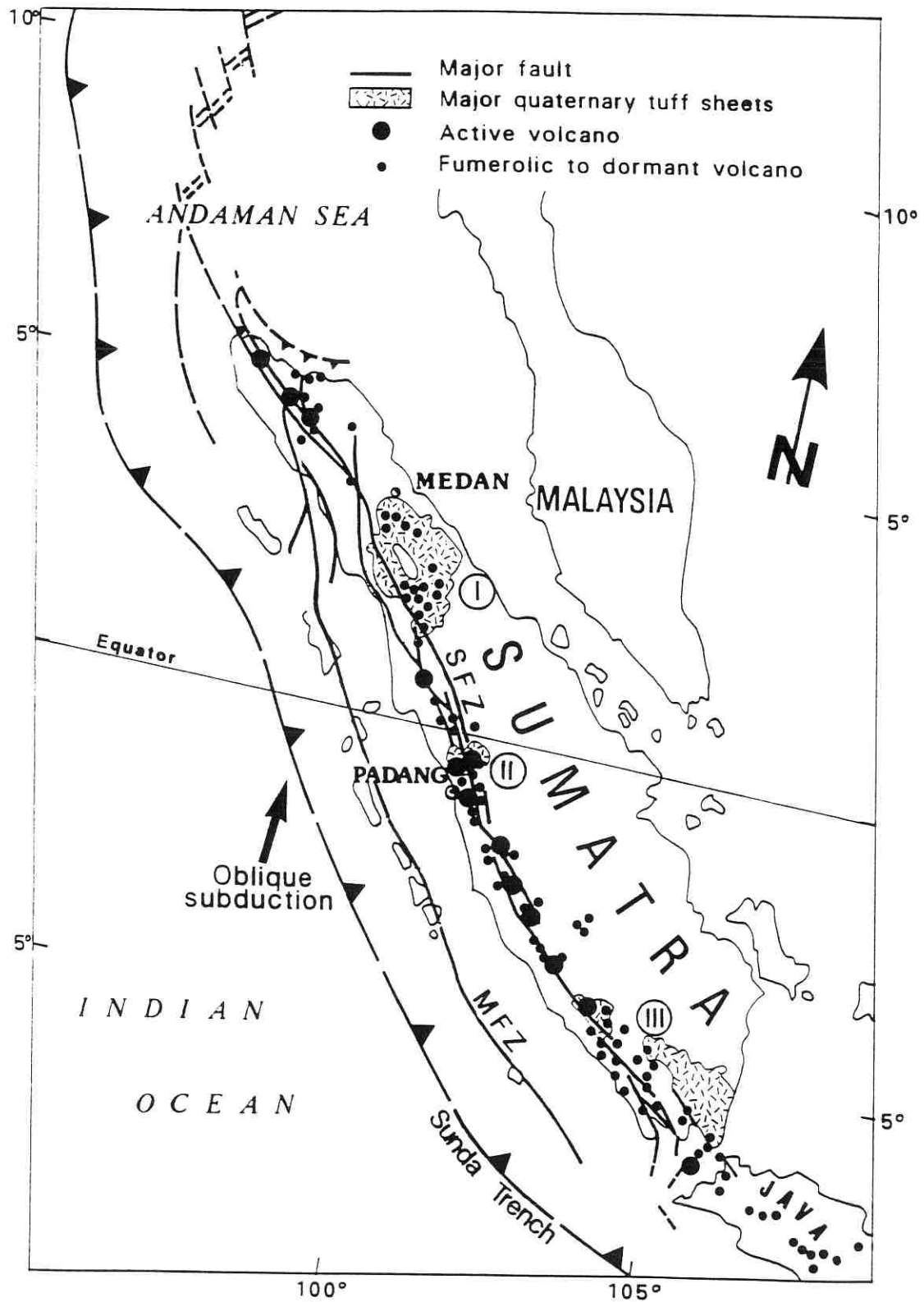
INTRODUCTION GÉNÉRALE

Ce rapport final présente les résultats des travaux de recherche réalisés sur la Grande Faille de Sumatra pendant une période de 3 ans. Ces recherches avaient pour but de préciser l'aléa sismique associé à cette grande faille. Ces résultats doivent maintenant être utilisés par les agences gouvernementales indonésiennes pour définir des programmes de prévention du risque sismique sur l'île de Sumatra, c'est-à-dire des programmes intégrant à l'aléa sismique, la densité de population, la valeur des biens... Ce travail de recherche correspond à une approche pluridisciplinaire qui associe trois spécialités différentes des sciences de la terre: néotectonique, géodésie et sismologie.

La Grande Faille de Sumatra a été choisie à la demande des autorités indonésiennes. Ce choix s'explique par le fait que cette faille, qui est longue de 1650 km, est une des failles actives majeures du SE Asiatique (Figures 1 et 2) et même une des structures importantes à l'échelle du globe (comparable notamment au système de faille de San Andreas en Californie). De plus, la sismicité historique, bien que ne couvrant qu'une période inférieure à deux siècles, montre l'existence de plusieurs séismes destructeurs (Figure 3 et Troisième Partie). Enfin, l'île de Sumatra, qui a une population d'environ 35 millions d'habitants pour une surface de 474 000 km² (densité nettement inférieure à celle de Java), est en plein développement. Il convient donc de connaître les aléas en vue de planifier judicieusement la localisation des futures zones de concentration de la population.

Figure 2 : Carte des structures majeures de Sumatra

SFZ, Grande Faille de Sumatra; MFZ, Faille de Mentawai; I, région du lac Toba; II, région du lac Singkarak; III, Région du lac Ranau



Un des problèmes majeurs qui se posait pour l'étude de la Grande Faille de Sumatra résidait dans le fait que le réseau sismologique mondial ne détecte quasiment aucun épicerentre en relation avec cet accident (Figure 4), Cette observation reflète-telle la réalité ou bien est-ce le réseau mondial qui est atteint d'une forte myopie sur Sumatra (erreurs importantes dans les localisations épicercentrales)?... Face à ces données trois scénarios étaient donc théoriquement envisageables :

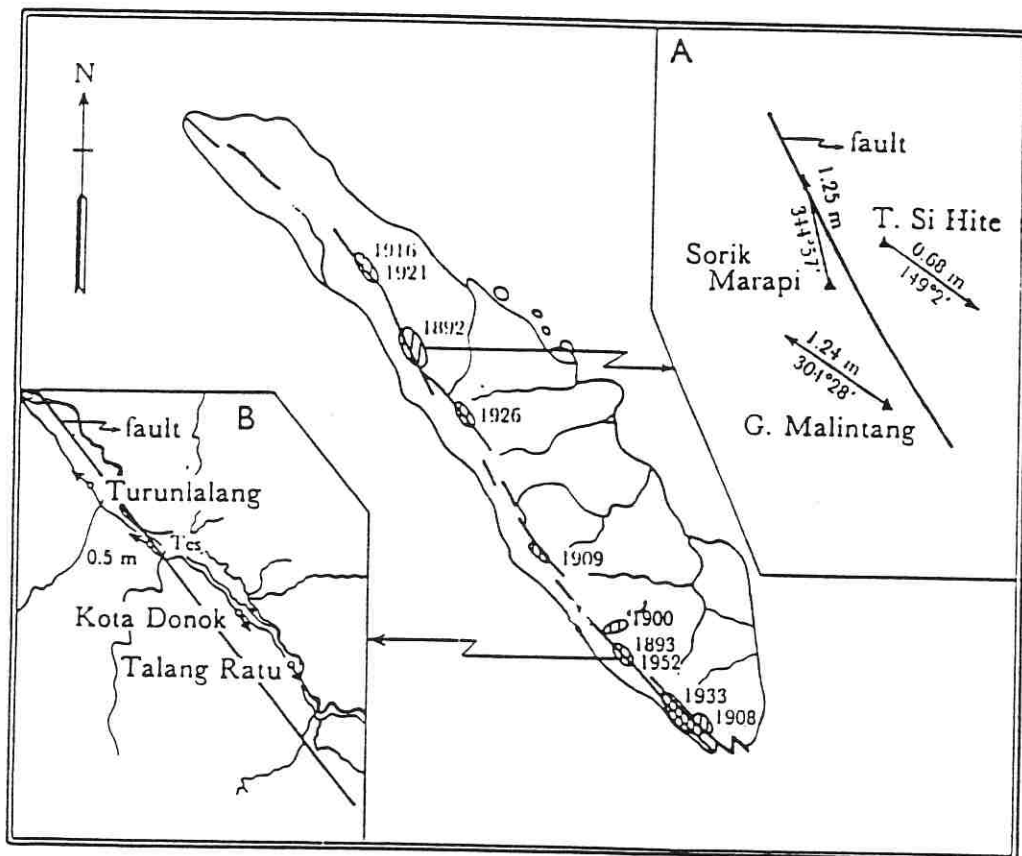
1) La Grande Faille de Sumatra, qui est localisée le long de l'Arc magmatique calco-alcalin de Sumatra, est dans une zone où le flux thermique est très élevé. En conséquence la transition ductile-cassante est superficielle (environ 5-10 km) et les événements sismiques majeurs ne peuvent pas nucléer suffisamment profondément (15-20 km) pour produire de très fortes magnitudes. En fait, on sait grâce aux données de la sismicité historique que cette hypothèse ne peut être retenue (présence de gros séismes destructeurs).

2) La Grande Faille de Sumatra est bloquée entre deux séismes destructeurs, c'est-à-dire qu'elle ne génère que très peu ou pas d'activité microsismique, ce "silence" inter-sismique serait en accord avec les données du réseau mondial. Dans ce cas, les mesures géodésiques devraient détecter une déformation cisailante très distribuée entre la côte de l'Océan Indien et l'arrière-arc de Sumatra; c'est-à-dire de part et d'autre de la trace de la faille, au travers de laquelle on ne mesurerait pas de mouvement. Ce scénario est de loin le plus défavorable, la Grande Faille de Sumatra ne libérant son énergie que lors de gros séismes destructeurs.

3) La Grande Faille de Sumatra est "asismique", c'est-à-dire que son mouvement correspond à des incréments de déplacements millimétriques, voire plus faibles (mouvement de type 'creep'). Dans ce cas, il devrait y avoir une importante activité microsismique le long de ce système de faille; cette activité ne serait pas détectée par le réseau mondial, soit parce que les magnitudes sont trop faibles, soit parce que les déterminations épicercentrales des magnitudes moyennes fournies par le réseau mondial sont erronées pour la région de Sumatra (problème de configuration de réseau). Quoiqu'il en soit, la géodésie devrait détecter des déplacements au travers de la trace de la faille en surface. Ce scénario n'implique pas que tout le mouvement de la Grande Faille de Sumatra soit libéré sous forme de 'creep' (cf. les segments en 'creep' de Californie). En revanche, on peut s'attendre à une fréquence plus basse d'événements destructeurs avec peut-être des magnitudes plus faibles.

En fait, les scénarios 2 et 3 peuvent être présents le long de la Grande Faille de Sumatra (cf. système de San Andreas), c'est-à-dire que l'on pourrait avoir une succession de segments bloqués ou en 'creep'.

Figure 3 : Séismes historiques et déplacements horizontaux cosmiques le long de la Grande Faille de Sumatra (Compilation de Katili et Hehuwat, 1967)

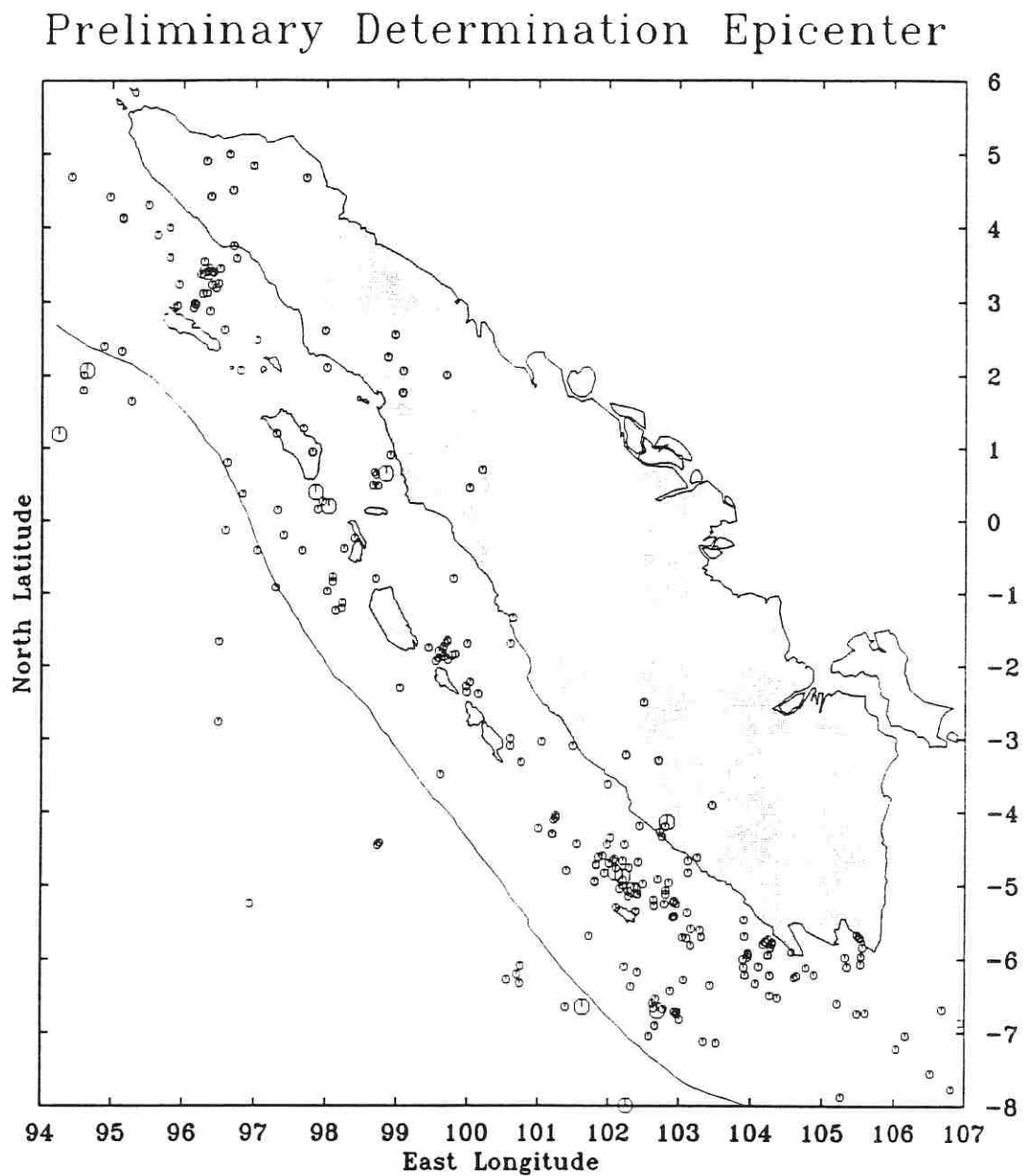


Seismic belt and direction of observed horizontal displacements along the Great Sumatran fault-zone.
 Fig. 4A indicates horizontal displacements of triangulation points during the Tapanuli earthquake in 1892.
 Fig. 4B shows direction of shifted buildings and houses during the Tes earthquake in 1952.

De manière à résoudre ces problèmes et préciser l'aléa sismique associé à la Grande Faille de Sumatra, nous avons dans une première partie analysé sur images satellites SPOT la géométrie de ce système de faille (cf. Première Partie). Ceci nous a permis de préciser la cartographie, la segmentation et la cinématique de la Grande Faille de Sumatra, puis de déterminer sa vitesse "long-terme", c'est-à-dire à l'échelle de quelques dizaines, voire quelques centaines de milliers d'années. Les deux résultats majeurs sont que le système de faille est essentiellement segmenté par des relais extensifs et que sa vitesse augmente du Sud vers le Nord. Par conséquent, la fréquence des séismes destructeurs devrait également tendre à augmenter vers le Nord de l'île, proportionnellement à la vitesse. Dans une deuxième partie, nous présentons les caractéristiques d'une première campagne d'instrumentation géodésique, terrestre et satellitaire, effectuée en deux régions situées le long de la Grande Faille de Sumatra. Les calculs réalisés grâce aux mesures satellitaires GPS ont montré que l'on avait une précision de l'ordre du centimètre qui sera améliorée lors de la campagne de remesure. On peut alors espérer atteindre une précision millimétrique. Enfin, dans la troisième partie, nous présentons les premiers résultats sismologiques. Ils montrent clairement la présence de nids d'activité sismique sur la Grande Faille de Sumatra qui sont incorrectement localisés par le réseau mondial. De plus, certaines zones ont une activité microsismique continue tandis que d'autres sont sismiquement actives sporadiquement lors de gros séismes. Ceci suggère donc l'existence de segments bloqués et de segments en 'creep' le long de la Grande Faille de Sumatra.

Figure 4 : Epicentres des séismes crustaux de Sumatra (réseau mondial)

Profondeurs des foyers < 40 km, $m_b > 5$ et déterminations par 20 stations minimum



PRÉSENTATION GÉNÉRALE

I - CADRE GÉODYNAMIQUE DE LA GRANDE FAILLE DE SUMATRA

Le système de subduction de la Sonde fait 3000 km de long, il s'étend tout au long de la fosse de la Sonde; depuis le Nord de l'île de Sumatra, à l'Ouest, jusqu'à l'île de Sumba, à l'Est (Figure 1). Le système de subduction moderne de l'arc de la Sonde fonctionne depuis le Tertiaire moyen. Ce système s'est installé sur un système tectonique pré-cénozoïque. La vitesse de convergence relative entre les plaques asiatique et indo-australienne est de l'ordre de 6 cm/an (Jarrard, 1986b). Des résultats récents montrent que ces vitesses seraient plutôt de l'ordre de 7,5 cm/an au niveau de Sumatra (De Mets et al., 1990). La direction de cette convergence varie entre N23°E au niveau de Sumatra et N24°E au niveau de Java, selon le modèle global de Minster et Jordan (1978). Dans ce modèle, le mouvement éventuel du Sud-Est de l'Asie par rapport à la plaque eurasiatique "stable", résultat de la collision entre l'Inde et l'Asie (Tapponnier et al., 1982) n'est pas pris en compte. La direction de la convergence entre les plaques Sud-Est Asiatique et indo-australienne semblerait plutôt proche de Nord-Sud (Jarrard, 1986a; 1986b). La direction de convergence est donc quasi normale à Java, mais oblique au niveau de Sumatra; le détroit de la Sonde apparaissant comme une zone de transition entre ces deux types de convergence.

L'arc magmatique de Sumatra est constitué de formations volcaniques et plutoniques, ainsi que de roches métamorphiques faisant partie du socle. La configuration actuelle de l'arc date du Miocène moyen. La Grande Faille de Sumatra se situe dans l'arc magmatique et le suit tout le long de Sumatra. Le domaine d'arrière-arc est caractérisé par des bassins remplis de séries sédimentaires tertiaires plissées. La base de ces séries sédimentaires (Paléogène et Miocène inférieur) repose en discordance sur la bordure NE de l'arc.

Le mouvement dextre de la Grande Faille de Sumatra est supposé accommoder la composante décrochante de la convergence oblique, parallèle à la limite de plaques (Jarrard, 1986a; 1986b; Beck, 1983; Hamilton, 1979; Fitch, 1972). Il serait donc responsable de la

migration vers le Nord-Ouest de la partie occidentale de Sumatra (Huchon et Le Pichon, 1984) et devrait transférer l'ouverture du bassin d'Andaman vers le détroit de la Sonde.

Les résultats des campagnes en mer conduites le long de l'avant-arc de Sumatra ont mis en évidence l'existence d'un système de failles parallèles à la Grande Faille de Sumatra et affectant le flanc occidental du bassin d'avant-arc de Mentawai (MFZ sur Figure 2) (Diament et al., 1990; 1991; 1992; Malod et al., 1992; 1993). Le mouvement dextre de cette faille pourrait accommoder une partie de la composante décrochante due à l'obliquité de la convergence des plaques par rapport à la fosse. Cette première interprétation permettrait d'expliquer la différence entre les vitesses estimées d'après les modèles globaux et les vitesses mesurées à l'aide des marqueurs géomorphologiques décalés sur la Grande Faille de Sumatra (Bellier et al., 1991a et ce rapport).

II - HISTOIRE SISMIQUE DE LA GRANDE FAILLE DE SUMATRA

Sept séismes historiques destructeurs (de magnitude proche ou supérieur à 6) ont été recensés sur cette Grande Faille de Sumatra (Figure 3). Ce sont les séismes de : Tapanuli en 1892, Kerinci en 1909, Padang Panjang en 1926 ($M_s = 6,75$) et en 1943 ($M_s = 7,6$), Liwa en 1933 ($M_s = 7,5$), Tes en 1952 ($M_s < 6,5$), Tarutung en 1987 ($m = 5,9$) (Katili, 1970; Katili et al., 1987; Hamilton, 1974; Untung et al., 1985; Earthquake Data Report, 1987). Cependant, une campagne de microsismicité réalisée sur la partie nord de cette grande faille n'a révélé qu'une faible activité microsismique (Kieckhefer, 1980).

III - VITESSE DE DÉPLACEMENT LE LONG DE LA GRANDE FAILLE DE SUMATRA.

La vitesse de déplacement de la Grande Faille de Sumatra est mal connue, elle a seulement été estimée sur la base de modèles de géodynamique globale entre 30 et 60 mm/an (Jarrard, 1986a et 1986b; Mc Caffrey, 1991). Le bassin d'Andaman s'étant ouvert d'environ 460 km depuis 13 Ma (Curry, 1989), sa vitesse d'ouverture est d'environ 40 mm/an. Si l'on considère que l'ouverture de la mer d'Andaman est transférée entièrement à la Grande Faille de Sumatra, cette dernière accuse donc dans sa portion septentrionale une vitesse de déplacement dextre d'environ 40 mm/an. Cependant, au Sud de Sumatra, les grabens sous-marins de l'Ouest du détroit de la Sonde, qui ont commencé à fonctionner il y a 5 à 6 Ma témoignent d'une ouverture d'environ 70 km qui correspondrait à une vitesse d'ouverture maximale de 10 mm/an. Si cette ouverture est due au déplacement dextre de la Grande Faille de Sumatra, cela impose au Sud de la faille une vitesse moyenne inférieure à 10 mm/an sur les 5-

6 derniers millions d'années (Lassal, 1991; Lassal et al., 1989; Pramumijoyo et Sébrier, 1991); vitesse qui a été confirmée par nos travaux de néotectonique (Sébrier et al., 1989). Il faut par conséquent amortir au moins 30 mm/an de déplacement horizontal sur la faille entre le Nord (40 mm/an) et le Sud de Sumatra (<10 mm/an) (Bellier et al., 1991a; Pramumijoyo, 1991; Diament et al., 1992).

L'analyse des documents satellitaires a permis de montrer que la Grande Faille de Sumatra est constituée d'un système complexe de failles en relais indiquant un mouvement dextre. L'évolution de ces zones de relais se déroule en plusieurs stades, de la formation de grabens en pull-apart jusqu'à leur extinction (Bellier et al., 1991a).

Le mouvement décrochant dextre de la Grande Faille de Sumatra a pu être mis en évidence grâce à de nombreux marqueurs morphologiques décalés. Notamment, les études néotectoniques menées dans la partie méridionale de Sumatra ont permis d'estimer une vitesse de déplacement dextre de 6 ± 4 mm/an (Bellier et al., 1991). Les résultats des travaux récents réalisés à partir d'images SPOT et développés dans ce rapport indiqueraient une vitesse de déplacement horizontal le long de la Grande Faille de Sumatra de l'ordre de 23 ± 2 mm/an au Nord de Sumatra en accord avec les vitesses proposées par Sieh et al. (1991) dans la même région (cf. détails dans première partie de ce rapport).

IV - AUTRES RÉSULTATS DÉJÀ OBTENUS DANS LE CADRE DE CE PROGRAMME

Ce projet s'inscrit donc dans un vaste programme sismotectonique conduit par des équipes franco-indonésiennes. Nous avons entrepris l'étude de la portion méridionale et centrale de la Grande Faille de Sumatra qui évolue sous des conditions de climat tropical humide. Dans ce domaine, où la couverture végétale et le climat humide sont très gênants pour le travail de terrain, nous avons commencé l'analyse de la Grande Faille de Sumatra par une étude géologique (Août-Septembre, 1989) associée à l'analyse de documents satellitaires et de photographies aériennes. Conjointement à ces travaux, une campagne de géodésie spatiale et terrestre conduite en été 1991 (Duquesnoy et al. 1992), et trois campagnes de géologie marine conduites en étés 1990, 1991 et 1992 (Diament et al., 1990; 1991 et 1992; Malod et al., 1992; 1993) ont été réalisées. Elles ont permis ou permettront de déterminer la vitesse de déplacement instantanée de la Grande Faille de Sumatra autour de la région de Ranau et de Singkarak, d'une part et de préciser la segmentation de l'avant-arc de Sumatra et la géométrie de la subduction de la plaque indo-australienne, d'autre part.

Les premiers résultats des campagnes en mer

Les premiers résultats des campagnes en mer conduites le long de l'avant-arc de Sumatra ont mis en évidence l'existence d'un système de failles parallèle à la Grande Faille de Sumatra et affectant le flanc occidental du bassin d'avant-arc de Mentawai (Diament et al., 1990; 1991; 1992; Malod et al., 1992; 1993). Le mouvement dextre de cette faille pourrait accommoder une partie de la composante décrochante due à l'obliquité de la convergence des plaques par rapport à la fosse. Cette première interprétation permettrait d'expliquer la différence entre les vitesses estimées d'après les modèles globaux et les vitesses mesurées sur la partie méridionale de la Grande Faille de Sumatra.

La campagne Sumenta II sur le N/O indonésien Baruna Jaya III.

Dirigée par Jacques Malod (GEMCO, Paris VI), la mission Sumenta II s'est déroulée du 27 août au 30 septembre 1992 et entre dans le cadre des programmes franco-indonésiens Mentawai et Sumenta qui portent sur l'étude des structures de l'avant-arc de Sumatra (Malod et al., 1992). Les objectifs de la mission Sumenta II ont été :

(1) de compléter la carte structurale de la partie septentrionale de l'avant-arc de Sumatra et d'étudier le prolongement de la Grande Faille de Sumatra vers le Nord, c'est-à-dire, vers le bassin de la mer d'Andaman. Cet objectif n'a pas été complètement atteint, en raison de la proximité de la frontière entre les eaux indonésiennes et indiennes.

(2) D'effectuer une reconnaissance au NE de Sumatra, au niveau du bassin d'arrière-arc Nord. Notre participation a consisté dans l'analyse du prolongement de la Grande Faille de Sumatra vers le Nord de l'île et des structures du bassin d'arrière-arc, au NE de Sumatra et, surtout, dans l'étude des relations entre ces deux domaines actifs.

Actuellement, les profils de cette campagne ont été partiellement dépouillés. Les profils effectués au niveau du prolongement de la Grande Faille de Sumatra en mer et du bassin d'arrière-arc Nord sont en cours d'étude. Ainsi, dans le prolongement de la Grande Faille de Sumatra, l'existence d'un graben orienté NW-SE a pu être mise en évidence. Le bord SW de ce graben est nettement marqué par des failles à composante normale, tandis que le bord NE apparaît moins continu en raison de la présence de structures volcaniques présumées, alignées selon une direction NW-SE. Des structures en fleur orientées NW-SE et liées au jeu décrochant de la Grande Faille de Sumatra ont également été observées dans ce graben. En ce qui concerne

le bassin de l'avant-arc, les premières analyses montrent que celui-ci est segmenté en trois bassins, du Nord vers le Sud :

(1) Le bassin d'Aceh, au Nord, qui est le plus profond. Il est limité au Sud par une structure compressive, la ride de Tuba.

(2) Le bassin de Simeulue qui occupe la partie centrale de la zone étudiée. Sa bordure Est est une zone de failles décrochantes qui est interprétée comme étant le prolongement de la zone de failles de Mentawai définie au Sud de l'équateur (Diament et al., 1992). Vers le Sud, ce bassin est limité par une structure compressive orientée E-W, la ride Banyak, comparable à celle de Tuba.

(3) Le bassin de Nias.

L'ensemble des résultats obtenus à l'issue de cette campagne devraient permettre de mieux contraindre les mécanismes de déformation de l'avant-arc de Sumatra, ainsi que le prolongement des structures de Sumatra vers la mer d'Andaman.

Exploitation des profils sismiques de la mission Sumenta II.

Les profils sismiques localisés au NE et au Nord de Sumatra sont l'objet d'un travail d'interprétation en collaboration avec les chercheurs du GEMCO. Nos objectifs sont d'analyser les structures du bassin d'arrière-arc Nord, ainsi que le prolongement de la Grande Faille de Sumatra vers le Nord. Étant donnés les premiers résultats obtenus, une comparaison sera peut-être à faire entre l'interprétation structurale de la zone située au Nord de l'île de Sumatra et certains aspects de la Grande Faille de Sumatra à terre (par exemple dans la région de la caldeira de Toba).

PREMIÈRE PARTIE

PARAMETRES DE L'ALEA SISMIQUE ASSOCIÉ A LA GRANDE FAILLE DE SUMATRA : GÉOMÉTRIE, SEGMENTATION ET VITESSE DE LA DEFORMATION ACTIVE

INTRODUCTION

Bien que la Grande Faille de Sumatra soit l'une des structures majeures du Sud-Est asiatique, il n'existait aucune cartographie géologique détaillée de cette faille. Les tracés des segments de faille active, les zones à risque géologique et les paramètres du risque sismique étaient presque inexistantes avant cet accord franco-indonésien.

C'est la raison pour laquelle, le DGGMR indonésien et la DRM française ont tenu à entreprendre ce projet d'étude sismotectonique pluridisciplinaire de la Grande Faille de Sumatra, dirigé par Michel Sébrier. Ce projet comprend quatre volets distincts mais complémentaires :

- un volet "néotectonique", sous la responsabilité de Michel Sébrier et Olivier Bellier, financé conjointement par la DRM et le MAE et qui comprend une analyse paléosismique et une analyse cinématique des différents tronçons actifs de la faille;

- un volet "analyse d'images" Spot, Landsat, Radar et de photographies aériennes, financé pour partie par les programmes PNTS et ISIS (CNES, CNRS/INSU...), dirigé par Olivier Bellier;

- un volet de "géodésie spatiale et terrestre", dirigé par Michel Kasser;

- un volet sismotectonique instrumentale de la Grande Faille de Sumatra et de l'avant arc de Mentawai co-financé essentiellement par la DRM et le CNRS/INSU, co-dirigé par M. Diament, R. Louat et J. Deverchère;

- et enfin une étude de géophysique et de géologie marine dans l'avant arc et l'arrière arc de Sumatra, développée et financée par le CNRS/INSU; les premières campagnes furent dirigées par M. Diament puis par J. Malod.

Le principal objectif de ce programme est de caractériser les paramètres essentiels de la déformation le long de la Grande Faille de Sumatra dans le but de minimiser ou de prévenir des risques sismiques probables le long de la faille.

FIGURE 1

Cadre tectonique du SE de l'Asie (d'après Rangin et al., 1990).

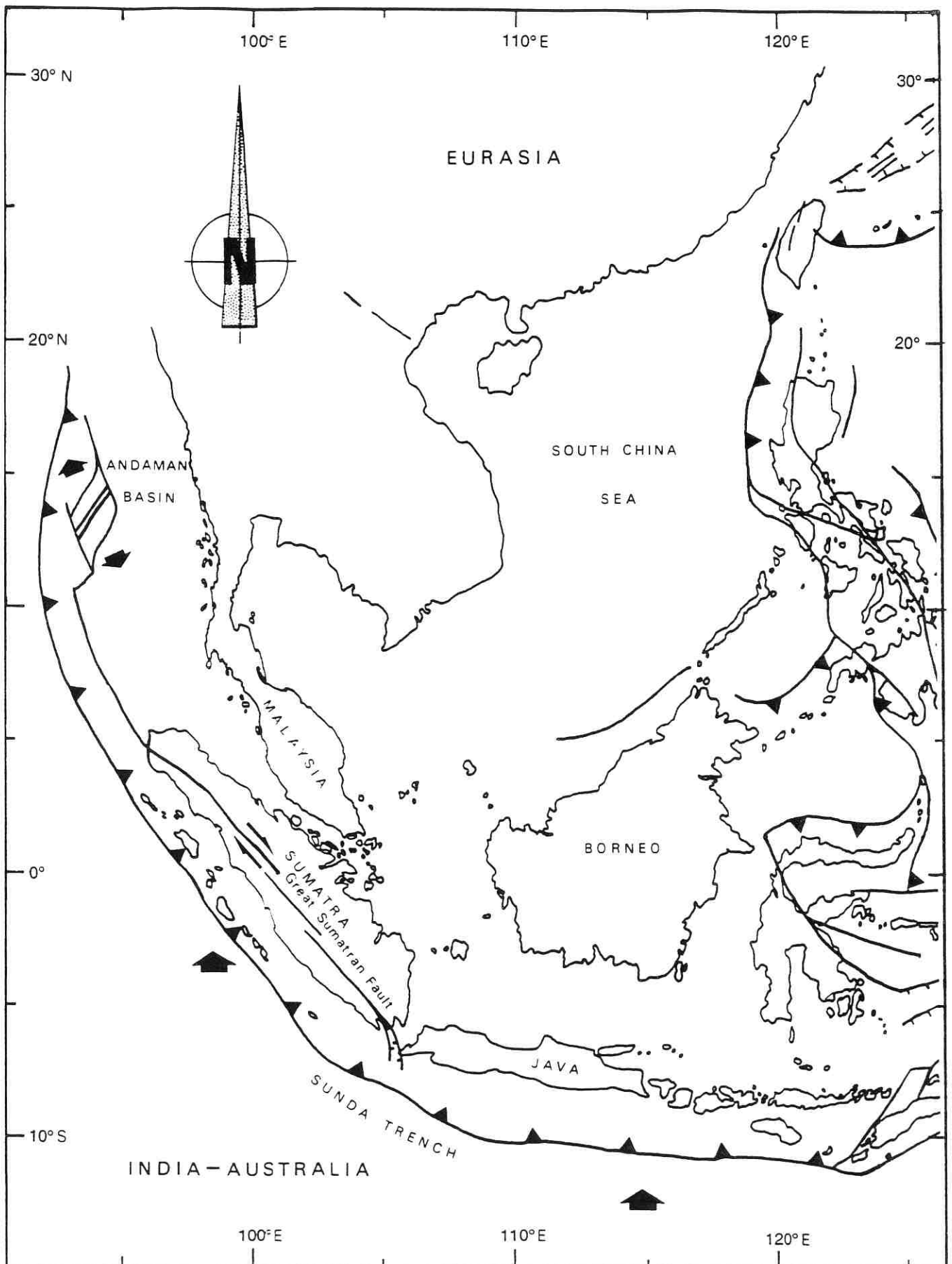


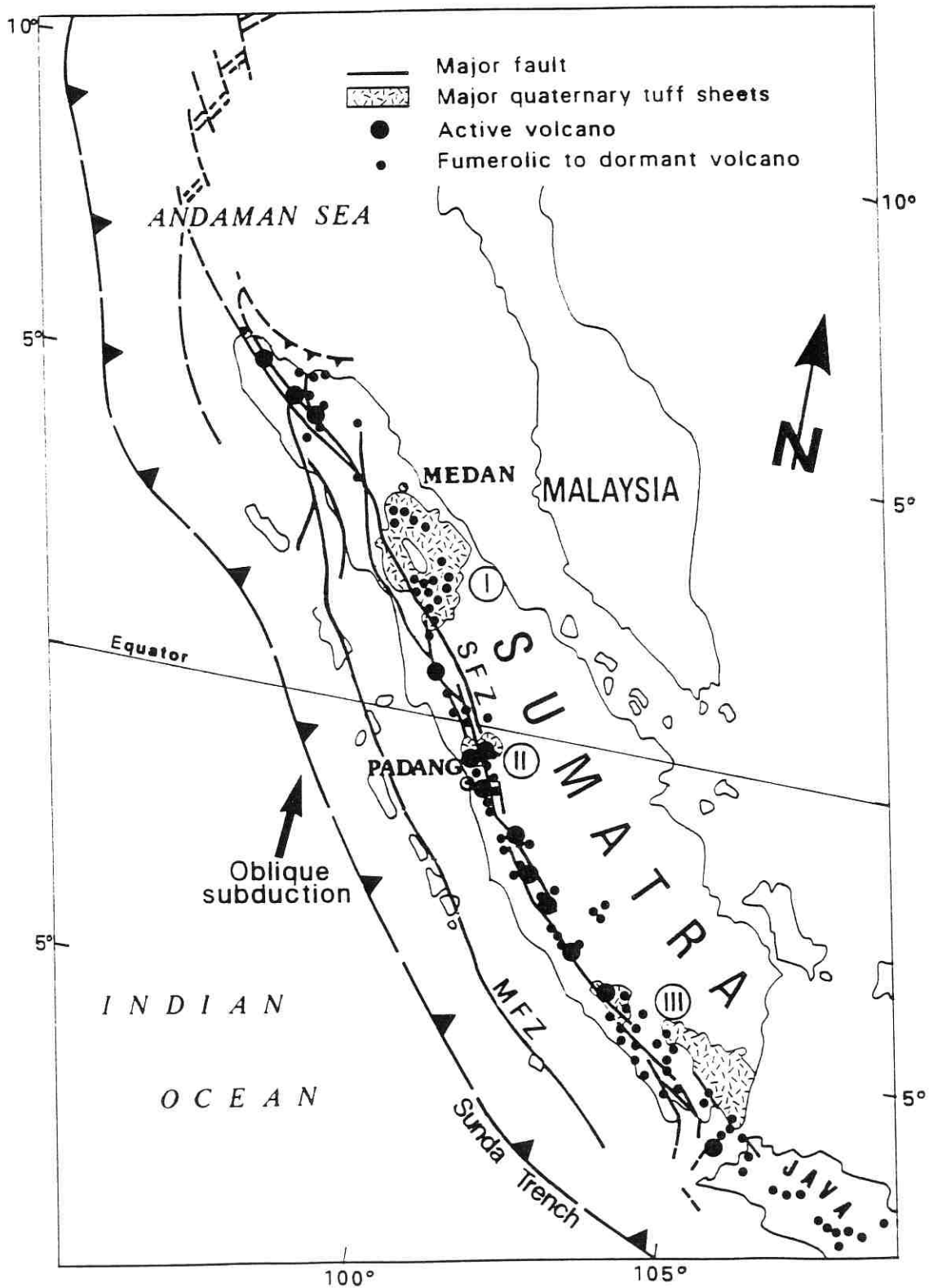
FIGURE 2

Carte structurale de Sumatra.

- SFZ marque la Grande Faille de Sumatra et montre les zones de relais en extension

- MFZ marque la faille de Mentawai

Zones d'études: I: région du lac Toba; II: région du lac Singkarak; III: région du lac Ranau.



Néotectonique et télédétection de l'arc de Sumatra : objectifs et résultats

Les premiers résultats de l'étude néotectonique de terrain menée dans la partie méridionale de Sumatra montrent (Sébrier et al., 1989; 1991; Pramumijoyo, 1991; Pramumijoyo et Sébrier, 1989;1991; Pramumijoyo et al., 1990) :

a - qu'après un décrochement dextre d'âge miocène, il s'instaure deux régimes d'extension dans la partie méridionale de Sumatra: une première extension pliocène de direction NE-SW, produit un mouvement purement normal sur la faille de Sumatra, puis une seconde extension, pléistocène à actuelle, de direction WNW-ESE produit un mouvement normal dextre de la faille;

b - que les vitesses de coulissement dextre du segment méridionale de la Grande Faille de Sumatra sont inférieures à 10 mm/an pour les périodes récentes; celles-ci sont donc bien inférieures à celles prédites par les modèles globaux et expliquent la sismicité relativement faible enregistrée sur cette faille.

Dans cette partie nous présentons l'état d'avancement des travaux récents de néotectonique et de télédétection développés le long de l'arc de Sumatra. Les résultats sont présentés en trois parties distinctes:

-> une partie sera entièrement consacrée à l'estimation des paramètres de la déformation active et des relations tectonique et volcanisme le long de la zone de faille de Sumatra dans la région de la caldeira de Toba. Cette région semble du point de vue des risques géologiques une région privilégiée;

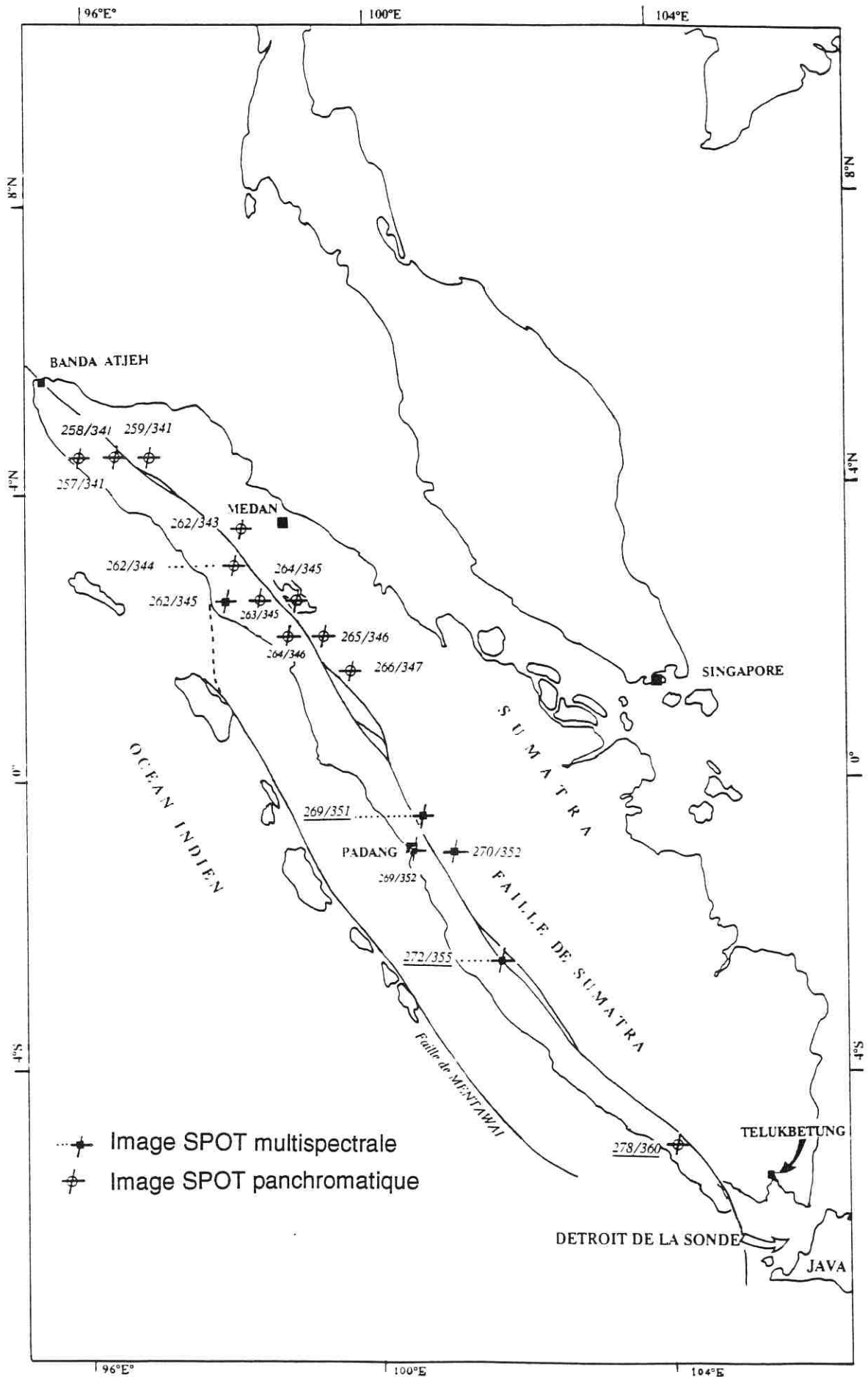
-> dans la partie suivante nous essayons de définir ou de préciser les vitesses de déplacement horizontal tout le long de la Grande Faille de Sumatra;

-> dans les conclusions, nous présenterons les estimations qui peuvent être calculées pour les paramètres de l'aléa sismique. Nous discuterons la segmentation de la Grande Faille de Sumatra et ses conséquences sur l'ordre de grandeur des magnitudes maximum. Enfin, en se basant sur les vitesses calculées le long du système de faille, nous estimerons l'ordre de grandeur des intervalles de récurrence entre séismes destructeurs.

Une grande partie du travail présenté ici repose sur l'analyse de seize images SPOT étudiées dans notre laboratoire (Figure 3). Les traitements ont été effectués en collaboration avec des chercheurs de l'Institut d'Astrophysique Spatial.

FIGURE 3

Localisation des images SPOT acquises par le LGDI.



**ANALYSE DE DOCUMENTS SATELLITAIRES COUVRANT LA PARTIE
SEPTENTRIONALE DE SUMATRA : LA RÉGION DE TOBA**

**VITESSE DE DÉFORMATION HORIZONTALE DE
LA GRANDE FAILLE DE SUMATRA
ET CONTRÔLE STRUCTURAL DE LA CALDEIRA DE TOBA**

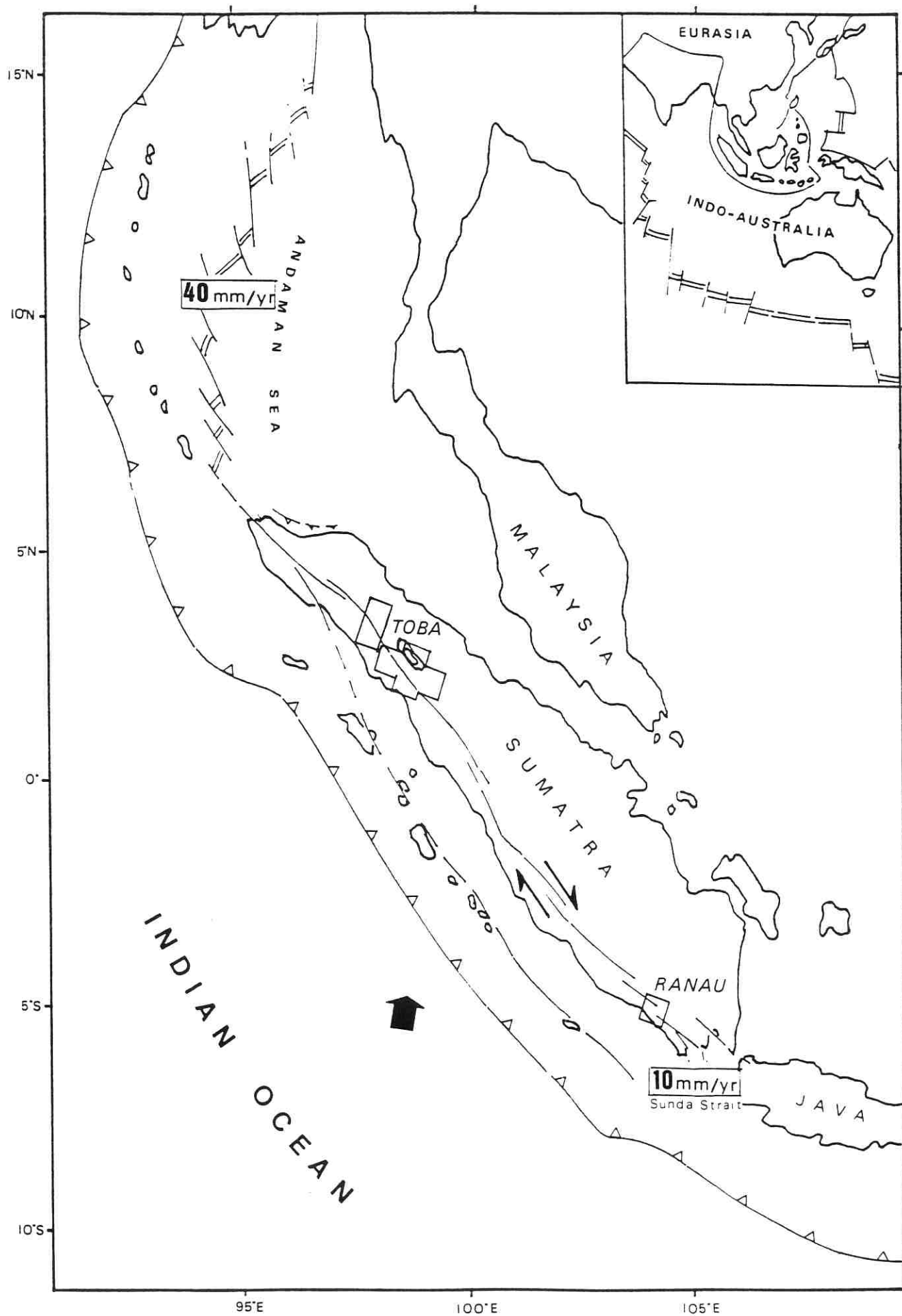
I - INTRODUCTION.

Les travaux présentés dans cette partie reposent sur l'analyse de six images Spot situées dans la région de la Caldeira de Toba (Figure 4) où le tracé de la faille de Sumatra semble souligner, de par sa morphologie, une activité actuelle importante. Cette étude nous a permis de définir la vitesse de déformation horizontale dans cette région relativement peuplée, notamment dans la région de Tarutung. La vitesse de déformation horizontale est évidemment un paramètre crucial de l'analyse du risque sismique. Nos nouvelles observations apportent donc une contrainte sur la vitesse du déplacement horizontal de la Grande Faille de Sumatra et, par conséquence, sur le risque sismique, dans la partie septentrionale de la faille.

D'autre part nous avons essayé de définir les relations entre le volcanisme et la tectonique dans cette région où se localise le plus importante caldeira quaternaire du monde. En effet, l'origine des grandes caldeiras reste encore largement incomprise. De nombreux volcans et des caldeiras existent le long de la Grande Faille de Sumatra (Figure 2), et il a été noté que plusieurs d'entre eux sont localisés dans des zones de relais extensifs (Bellier et al., 1991a). Bien que la caldeira de Toba ne soit pas trouvée sur la trace actuelle de la Grande Faille de Sumatra, à environ 12 km au NE de celle-ci, des données tirées d'images SPOT panchromatiques suggèrent que la mise en place de la caldeira de Toba pourrait être contrôlée par le développement de la Grande Faille de Sumatra.

FIGURE 4

Localisation des images SPOT étudiées.



II - CINÉMATIQUE ET VITESSE DE DÉPLACEMENT DE LA GRANDE FAILLE DE SUMATRA

Comme nous l'avons, vu la vitesse du mouvement horizontal sur la Grande Faille de Sumatra a d'abord été estimée à partir de modèles géodynamiques globaux à 30-50 mm/an (Jarrard, 1986a, 1986b). Le mouvement décrochant dextre de la Grande Faille de Sumatra a pu être mis en évidence grâce à de nombreux marqueurs morphologiques décalés. Des études menées dans la partie méridionale de Sumatra ont permis d'estimer une vitesse de déplacement dextre de 6 ± 4 mm/an (Bellier et al., 1991a; 1991b). Il faudrait donc amortir environ 30 mm/an de déplacement dextre le long de la Grande Faille de Sumatra entre le détroit de la Sonde, au Sud, et la mer d'Andaman, au Nord. Dans la région de Toba, Sieh et al. (1991) ont proposé une vitesse de déplacement dextre de 28 mm/an environ, correspondant à un décalage de cours d'eau de 2 km.

Dans la région du lac Toba (Figures 5a et 5b), le décalage du réseau hydrographique montre effectivement la composante décrochante dextre de la Grande Faille de Sumatra (encart haut, Figures 5b et 6). Observé dans les tufs de Toba, ce décalage permet d'évaluer la vitesse de déplacement dextre le long de la Grande Faille de Sumatra. Étant donné le climat tropical humide de la région et les caractéristiques lithologiques des tufs (ignimbrites peu soudées), la dynamique érosive des rivières est élevée et l'incision des tufs est très rapide. On peut donc considérer que le réseau hydrographique observé actuellement à la surface des tufs de Toba s'est installé immédiatement après la mise en place de ceux-ci. L'âge des décalages des rivières mesurés est donc très proche de celui des tufs de Toba. Au Nord du bassin losangique de Tarutung, sept cours d'eau décalés ont été observés. Les décalages moyens des réseaux hydrographiques observés sont compris entre 500 et 1660 mètres (avec une erreur de plus ou moins 30 mètres sur chaque mesure), et correspondent donc au rejet horizontal de la Grande Faille de Sumatra, depuis l'émission des tufs de Toba. L'âge de ces tufs étant de 73000 ± 4000 ans (Chesner et al., 1991), la vitesse de déplacement dextre calculée relatif au décalage maximum mesuré est donc de l'ordre de 23 ± 2 mm/an. Cette vitesse est inférieure à celle estimée par Sieh et al. (1991) dans la région, et à celle déduite des modèles globaux.

III - LA CALDEIRA DE TOBA.

La caldeira de Toba appartient à l'arc magmatique de Sumatra, et est située approximativement à la limite des bassins Septentrional et Central de l'arrière-arc. Cette caldeira a attiré notre attention, en raison de sa forme allongée, de sa taille et de sa position par rapport à la Grande Faille de Sumatra (Figures 5a et 5b).

De forme elliptique, la caldeira de Toba est longue de 100 km et large de 30 à 40 km environ; c'est la plus grande caldeira quaternaire connue au monde (Aldiss et Ghazali, 1984), et

elle a produit une des plus importantes éruptions quaternaires recensées. Les tufs de Toba émis lors de la formation de la caldeira s'étendent sur une surface de 20000 km² environ. Ces tufs correspondent à l'ultime phase éruptive paroxysmale ("Youngest Toba Tuffs") (Chesner et al., 1991). Les datations radiochronologiques effectuées sur les tufs de Toba ont livré des âges compris entre 1,9 MA et 30000 ans (e.g., Chesner et al., 1991; Aldiss et Ghazali, 1984). Cependant, les tufs correspondant à l'éruption majeure ont été récemment datés à 73000 ± 4000 ans (Chesner et al., 1991).

IV - ANALYSE STRUCTURALE DE LA CALDEIRA DE TOBA

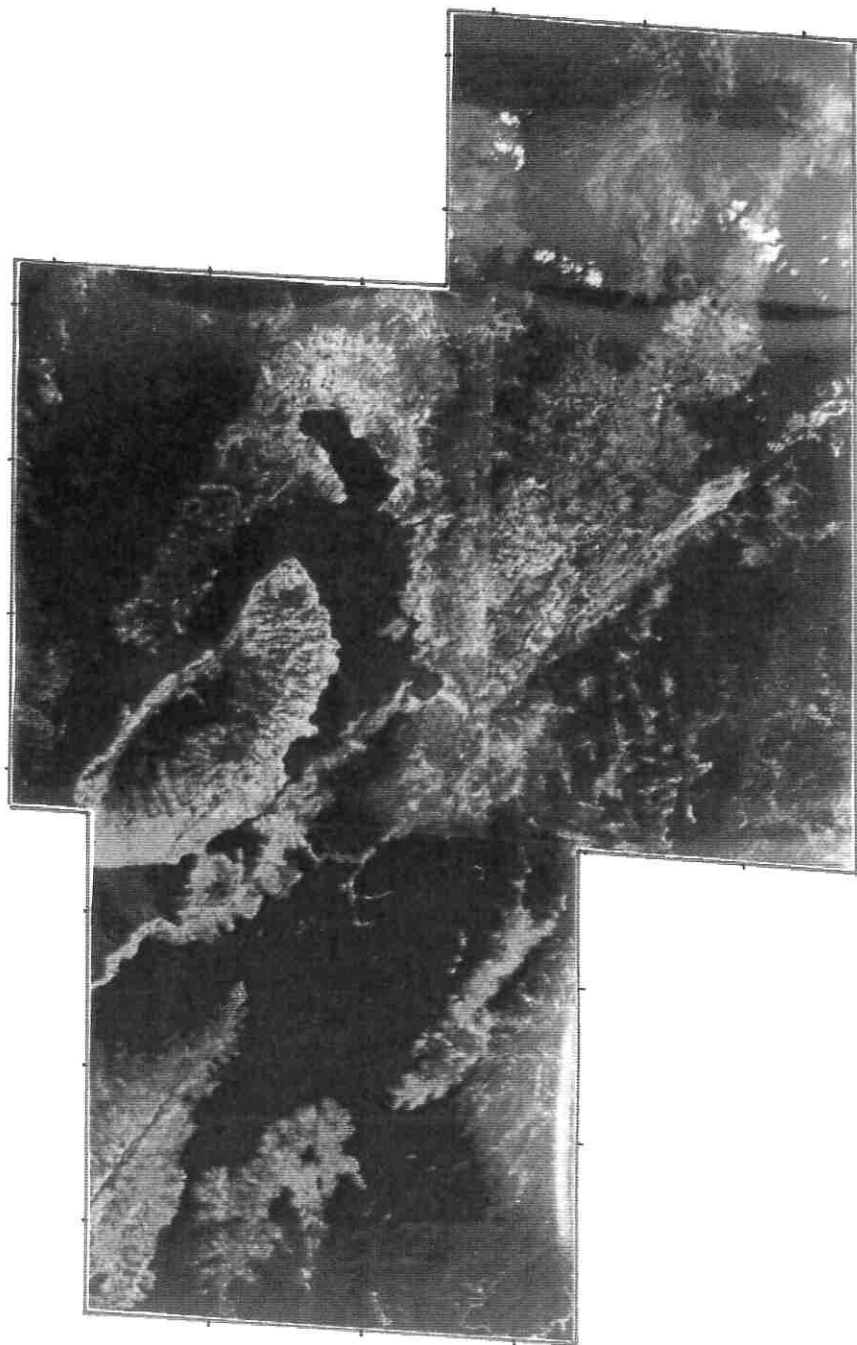
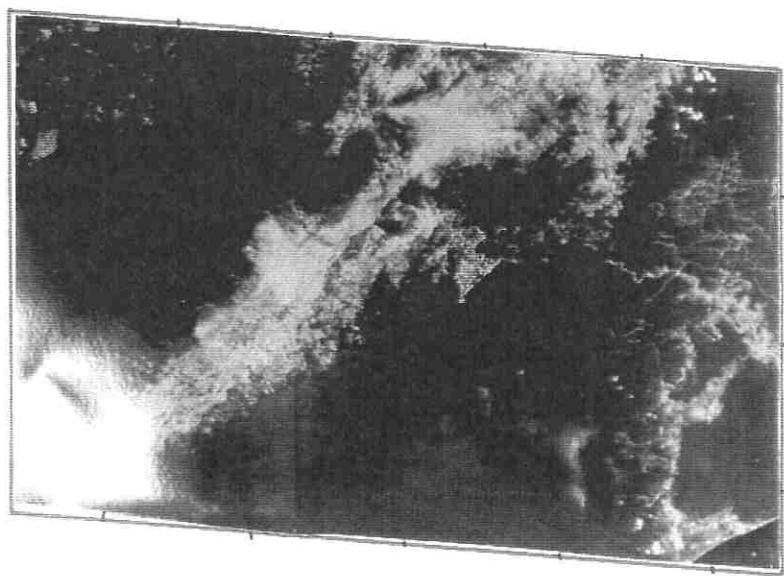
L'analyse d'images satellite SPOT a permis d'étudier les structures de la caldeira de Toba, ainsi que la géométrie et la cinématique de la Grande Faille de Sumatra dans la région de Toba. Ce travail repose sur six scènes SPOT panchromatiques couvrant la région du lac Toba: 262/343, 262/344, 263/345, 264/345, 264/346 et 265/346 (Figures 4 et 5). La couverture nuageuse étant très dense dans cette région de Sumatra, nous n'avons pu obtenir un jeu d'images complet. C'est la raison pour laquelle une partie septentrionale (scène 263/344) de la zone d'étude n'apparaît pas sur les Figures 5a et 5b.

La carte interprétative des images SPOT couvrant la région de Toba met en évidence (Figure 5b): D'une part, la caldeira de Toba qui se situe à une douzaine de kilomètres au NE de la Grande Faille de Sumatra et dont les bordures sont linéaires et parallèles à celle-ci. D'autre part, la trace actuelle de la Grande Faille de Sumatra qui affecte les tufs de Toba et dont le jeu décrochant dextre est notamment mis en évidence par le décalage de rivières. Des observations de détail montrent que, au niveau de la bordure NE, l'effondrement de la caldeira est marqué par de nombreuses petites failles (1 à 3 km de longueur) qui forment globalement un linéament orienté NW-SE, parallèlement au tracé actuel de la Grande Faille de Sumatra. Également orientée NW-SE, la bordure SW de la caldeira montre plutôt un contour irrégulier, et est caractérisée par une activité hydrothermale et un volcanisme postérieurs à la mise en place de la caldeira qui se manifestent selon un alignement NW-SE. L'extrémité SE de la caldeira de Toba est caractérisée par des failles normales qui soulignent son contour circulaire. Ces structures sont typiques des caldeiras dont l'effondrement est contrôlé par des failles à fort pendage et montrant un mouvement purement vertical.

L'analyse des images SPOT, ainsi que des observations de terrain montrent que l'île Samosir est un demi-horst basculé vers l'Ouest. Ce bloc est bordé au NE par une faille normale caractérisée par un escarpement à regard NE d'environ 750 mètres de hauteur (carte topographique et données de terrain) et parallèle à la Grande Faille de Sumatra. Le bloc de Samosir est affecté par des failles kilométriques à composante essentiellement normale, relatives à l'évolution post-éruptive de la caldeira.

FIGURE 5a

Mosaïque des images SPOT couvrant la région du lac Toba.



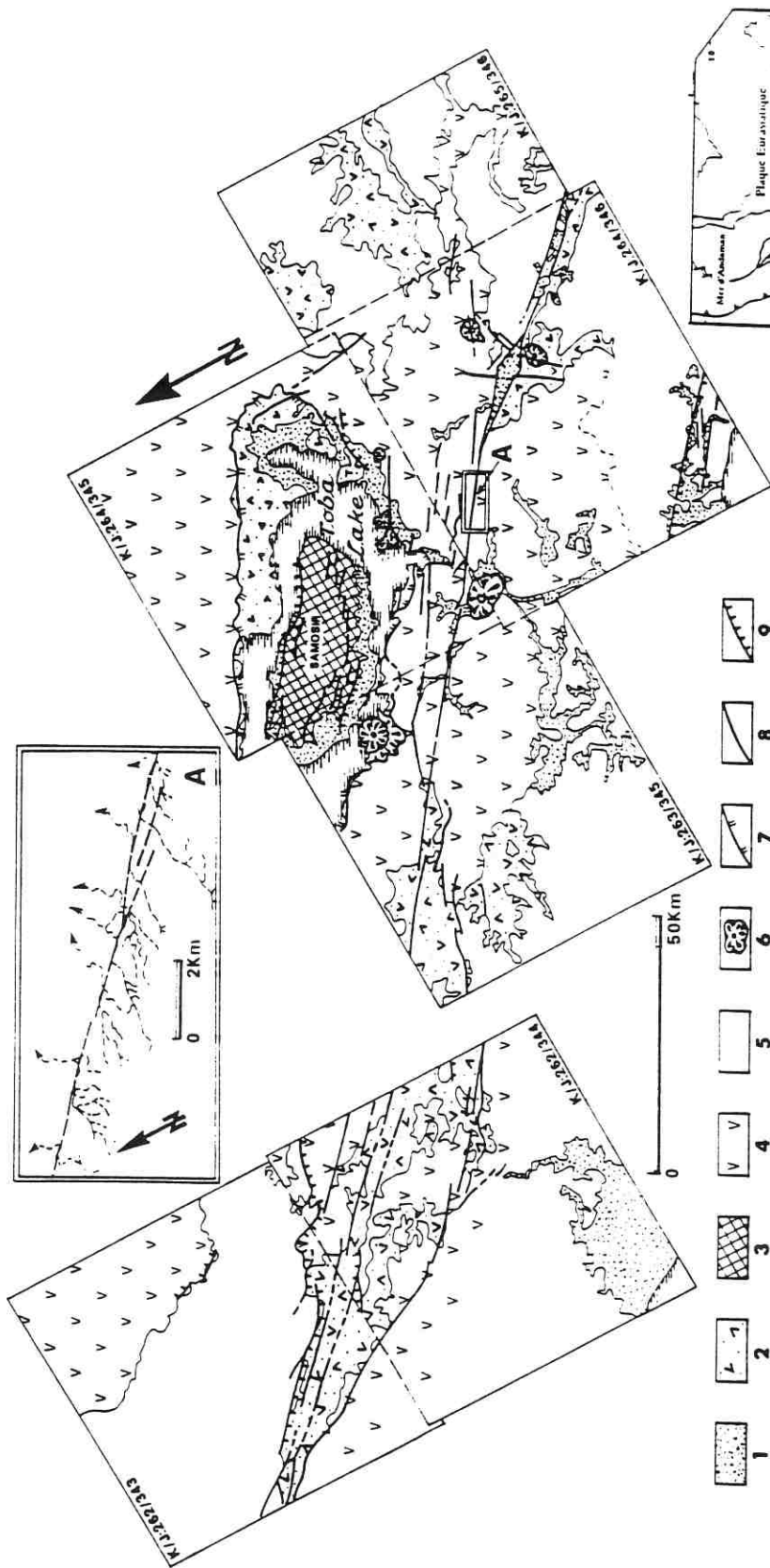


FIGURE 5b

Carte structurale de la région du lac Toba établie à partir de l'interprétation des scènes SPOT 262/343, 262/344, 263/345, 264/345, 264/346 et 265/346.

Encart A: réseau hydrographique décalé. 1: dépôts alluviaux quaternaires récents; 2: formations volcano-sédimentaires (tufs de Toba remaniés); 3: formations lacustres de l'île Samosir; 4: tufs de Toba; 5: substratum anté-tufs de Toba; 6: volcans récents post-Toba; 7: remparts de la caldeira; 8: failles; 9: failles à composante normale.

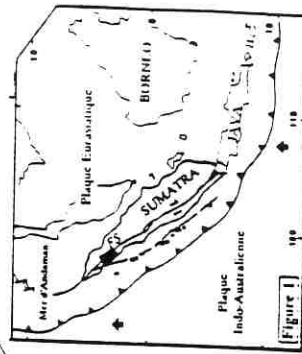


Figure 1

V - RELATIONS ENTRE LA GRANDE FAILLE DE SUMATRA ET LA CALDEIRA DE TOBA

La proximité immédiate et la forme très allongée de la caldeira, parallèle à la trace actuelle de la Grande Faille de Sumatra indiquent que l'effondrement de la caldeira a été contrôlé par des failles orientées NW-SE qui devraient appartenir au système de failles de Sumatra.

Plusieurs arguments sont en faveur d'un contrôle tectonique de la mise en place de la caldeira de Toba:

(1) La forme d'ellipse allongée de la caldeira, parallèle à la trace actuelle de la Grande Faille de Sumatra, et dont le grand axe NW est trois fois supérieur au petit axe NE.

(2) La bordure NE de la caldeira est rectiligne et à peu près parallèle à la trace active de la Grande Faille de Sumatra. Dans le prolongement de cette bordure, une faille normale identifiée sur l'image SPOT 262/343 limite la bordure septentrionale d'une ancienne zone de relais.

(3) L'île Samosir est un demi-horst allongé, affecté et limité par des failles principalement orientées NW-SE.

Les structures que l'on observe actuellement indiquent que la mise en place de la caldeira de Toba s'est effectuée dans un système de failles globalement orientées NW-SE.

VI - CONCLUSIONS ET DISCUSSION.

Cette analyse d'images SPOT soulève le problème de l'origine du contrôle structural de l'effondrement de la caldeira. Aucune trace de mouvement décrochant n'est visible le long de la bordure NE de la caldeira qui demeure rectiligne depuis la mise en place des tufs, malgré le pouvoir érosif des cours d'eau. La bordure NE de la caldeira semble donc, par sa linéarité, être l'expression en surface d'une structure plus profonde. D'où l'hypothèse de l'existence d'un système de failles indépendant du système principal, et comparable à certaines failles sub-verticales orientées NW-SE visibles dans les bassins Central et Sud de l'arrière-arc de Sumatra (Aldiss et Ghazali, 1984). Par ailleurs, la géométrie de la caldeira, ainsi que l'existence de failles quaternaires non actives orientées NW-SE au NW de la caldeira, indiquent que la mise en place de la caldeira de Toba a pu se produire dans une vaste zone de relais actuellement abandonnée. Le "raccordement" de ces failles quaternaires ayant contrôlé l'effondrement s'effectuerait au Nord de la caldeira. Nous proposons un modèle d'évolution de la mise en place de la caldeira de Toba (Figure 7): un premier stade voit la formation d'un pull-apart dans une zone de relais extensif (environ 200 km de longueur sur 50 km de largeur) le long de la Grande Faille de Sumatra (stade 1); cette zone d'effondrement et de faiblesse crustale va s'accroître en permettant le développement de failles normales et la mise en place de caldeiras volcaniques d'abord de taille modeste (stade 2), puis gigantesque, avec l'effondrement de la caldeira de Toba (stade 3). L'extinction de la zone de

relais semble la conséquence du développement d'une faille majeure néoformée à travers la zone de relais (stade 4) comme dans le cas des pull-aparts observés au Sud de Sumatra (Bellier et al., 1991a; 1991b).

L'imagerie SPOT dans la région de Toba nous a également permis de contraindre la vitesse du déplacement dextre le long de la Grande Faille de Sumatra. Cette vitesse de 23 ± 2 mm/an est supérieure à celle qui fut estimée au Sud de Sumatra, de l'ordre de 6 ± 4 mm/an (Bellier et al., 1991a). Cette variation de la vitesse de déplacement le long de la Grande Faille de Sumatra s'expliquerait par la déformation de l'avant-arc: soit par un étirement longitudinal de celui-ci (McCaffrey, 1991), soit par un transfert du mouvement dextre vers la faille de Mentawai (Diament et al., 1992). Cette faille, orientée NW-SE, constitue la limite occidentale du bassin d'avant-arc. Nous pensons qu'il faut chercher un modèle associant ces deux types de déformation de l'avant-arc pour expliquer cette variation de la vitesse de décrochement le long de la Grande Faille de Sumatra.

FIGURE 6

Détail de l'image SPOT 264/346: agrandissement du quart Nord-Ouest
(région de Tarutung).

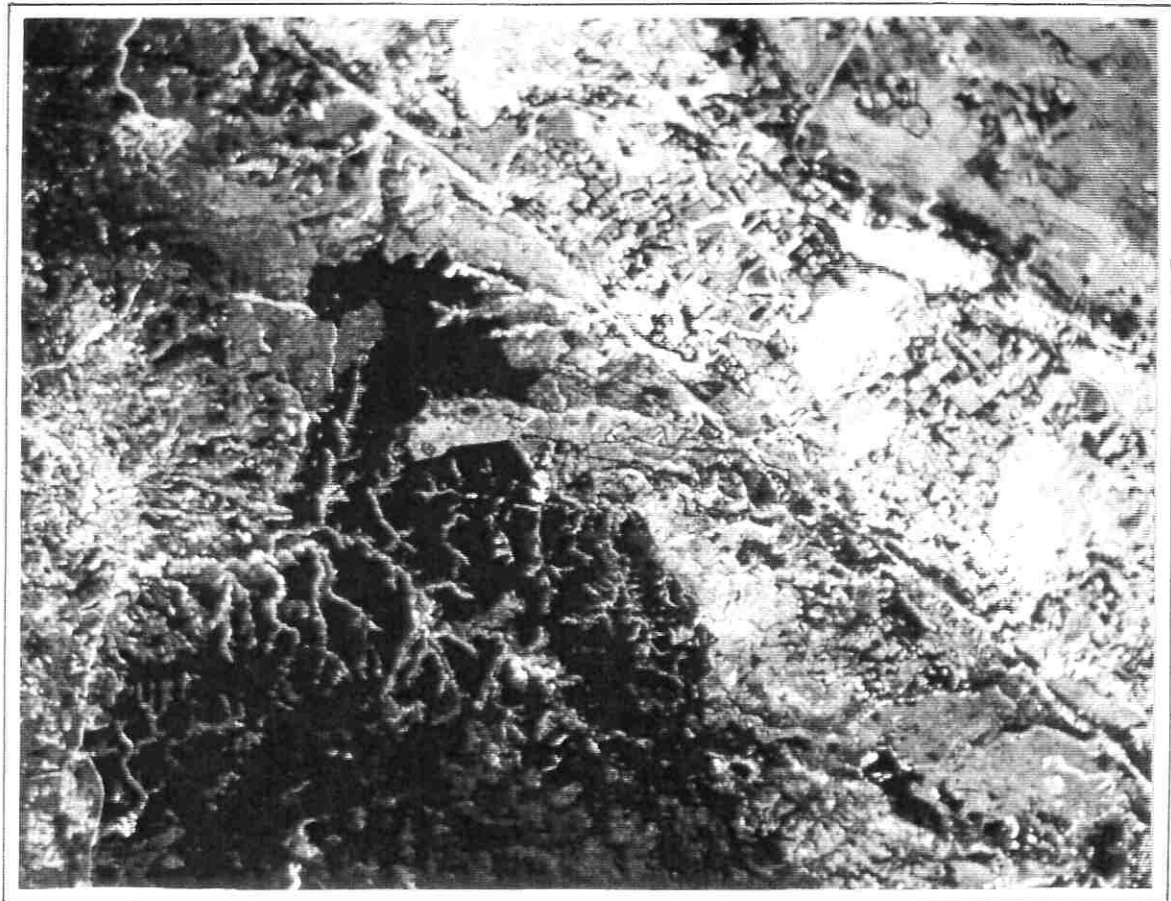
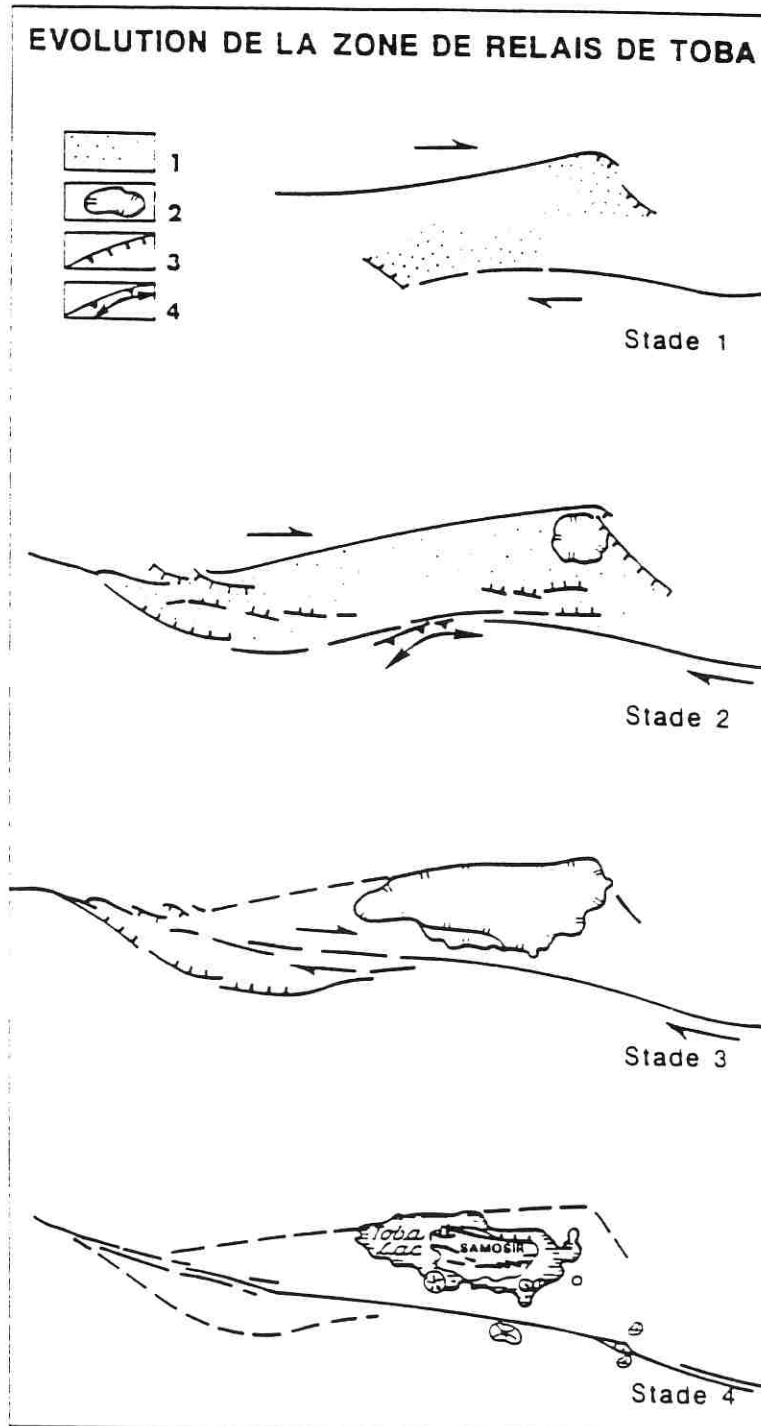


FIGURE 7

Hypothèse d'évolution de la caldeira de Toba.

Stade 1: formation d'un graben en pull-apart dans une zone de relais de la Grande Faille de Sumatra. Stade 2: développement de failles normales et mise en place d'une caldeira volcanique de taille modeste. Stade 3: effondrement d'une caldeira volcanique de très grande taille, modelée par le jeu de la Grande Faille de Sumatra. Stade 4: extinction du graben en pull-apart par le jeu de la faille majeure à travers la zone de relais.



**ANALYSE DES DOCUMENTS SATELLITAIRES
EN VUE D'ESTIMER LES VITESSES DE DÉPLACEMENT
DE LA GRANDE FAILLE DE SUMATRA**

SYNTHÈSE DES RÉSULTATS A L'ÉCHELLE DE LA FAILLE DE SUMATRA

I - OBJECTIF DE L'ANALYSE

L'étude du risque sismique se trouve nettement améliorée par la connaissance du mécanisme des failles et de leur vitesse de déplacement. Les résultats encourageants obtenus jusqu'alors sur la cinématique de la Grande Faille de Sumatra, les régimes tectoniques et les vitesses de déplacements transcurrents, nous ont incités à poursuivre cette étude, notamment dans le but de caractériser la déformation instantanée de la Grande Faille de Sumatra.

L'analyse de documents satellitaires de la Grande Faille de Sumatra a permis de montrer que la zone de failles est constituée d'un système complexe de failles en relais, essentiellement extensifs, indiquant un mouvement dextre. Des vitesses de décrochement dextre ont été déduites à partir de plusieurs marqueurs morphologiques décalés. Elles sont d'environ 6 ± 4 mm/an et en accord avec les premières estimations de terrain (Bellier, 1990; 1991; Bellier et al., 1991a et 1991b; Sébrier et al., 1989). Les résultats de travaux récents réalisés à partir d'images Spot couvrant la partie septentrionale de Sumatra (Région de Toba) semblent confirmer les vitesses de déplacement, de l'ordre de 25 mm/an au maximum (cf. partie précédente du rapport).

La présente étude a permis en outre de confirmer les valeurs faibles de la vitesse de déplacement sur la portion méridionale de la grande faille de Sumatra et de préciser si les vitesses dans les parties centrale et septentrionale sont de l'ordre de celles estimées par les modèles globaux.

II - INTRODUCTION

L'analyse des images SPOT a représenté une progression importante pour l'analyse détaillée de la géométrie et de la déformation des failles actives. Dans des zones à climat tropical humide à fort couvert végétal ce type d'approche semble plus difficile, cependant on y obtient des

résultats satisfaisants (Bellier et al., 1991a). L'analyse des images satellitaires a permis de cartographier en partie la Grande Faille de Sumatra et d'estimer à partir de l'observation de marqueurs géomorphologiques datés la quantité de rejet horizontal et la vitesse de déplacement le long de celle-ci (Bellier et al., 1991a). Cependant, ces marqueurs étant peu nombreux, nous avons utilisé le réseau hydrographique décalé pour compléter les données de vitesses le long de la Grande Faille de Sumatra. Les documents utilisés dans ce travail sont des images SPOT panchromatiques d'une résolution de 10 m, résolution qui permet de réaliser ce type d'étude de détail (Figure 4). Les vitesses ont été calculées par la méthode développée par Gaudemer et al. (1989).

La vitesse le long de la Grande Faille de Sumatra représente un facteur important à déterminer. En effet, nous savons que les modèles globaux donnent des vitesses très élevées de 40 à 50 mm/an, et celles-ci sont en désaccord avec des vitesses beaucoup plus faibles calculées au Sud (Bellier et al., 1991a; Lassal, 1989). De plus, la sismicité historique et instrumentale est relativement faible étant donné le taux de déformation escompté d'après les modèles globaux.

III - MÉTHODE UTILISÉE

Des observations réalisées le long de failles actives californiennes recoupant des cours de rivières montrent que (Gaudemer et al., 1989) :

- 50 à 65 % des rivières traversent les failles sans décalage évident;
- 75% des rivières décalées sont décalées dans un sens compatible avec le mouvement le long de ces failles;
- les rivières ont une croissance vers l'amont, c'est "l'érosion régressive";
- le décalage apparent de la rivière au niveau de la faille augmente avec le temps;
- plus une rivière est longue, plus le décalage apparent est grand;
- les rivières décalées dans un sens non compatible avec le mouvement des failles montrent des évidences de capture par un autre cours d'eau. Ces décalages ne peuvent donc pas être utilisés dans le calcul.

En ce qui concerne les rivières décalées, pour chaque faille il existe une corrélation linéaire entre "**d**" (décalage apparent de la rivière au niveau de la faille) et "**L**" (longueur de la rivière en amont de la faille).

$$d = cte \times L \quad (1)$$

Le décalage "**d**" augmentant avec le temps, cela implique un allongement des rivières avec le temps. En supposant que les rivières enregistrent le décalage le long de la faille à un temps "**t**",

on peut en déduire les vitesses de déplacement.

$$d = v \times t \quad (2) \qquad L = f(t)$$

En conséquence, le décalage apparent d'une rivière traversant une faille décrochante est une valeur minimum du déplacement cumulé le long de la faille depuis l'installation du système de drainage.

Si on suppose que "L" est relié au temps par une relation linéaire simple:

$$L = a \times t \quad (3)$$

où "a" est une constante traduisant les effets conjugués du climat, de la lithologie, et variations du niveau marin, on obtient un système de 3 équations à 4 inconnues à résoudre (1) (2) et (3).

1ère étape Dans une zone où l'on observe un réseau hydrographique décalé dont la mise en place est bien datée et donc où la vitesse est connue, on peut alors calculer le facteur "a". Pour cette étape primordiale, nous avons utilisé la région de Toba où le réseau hydrographique décalé est très bien marqué et où la vitesse de décrochement a pu être établie avec une relative précision (voire première partie).

2ème étape Si l'on suppose que le facteur "a" a une signification régionale (homogénéité du climat et de la lithologie, et variations du niveau marin qui ne sont pas considérables pour les altitudes de la région étudiée), on peut alors à partir de l'observation de rivières décalées en d'autres points de la faille, résoudre le système de trois équations à trois inconnues et déterminer la vitesse "v".

IV - CALCUL DU PARAMÈTRE " a "

La zone étudiée est située au Sud du Lac de Toba. Les rivières décalées ont été observées sur un agrandissement du quart Nord-Ouest de l'image SPOT 264-346, après traitement par ondelettes, développé à l' I.A.S. (Figures 8 et 9). La relation linéaire entre "d" et "L" a été établie à partir de données mesurées sur 6 rivières décalées (Figures 8 et 9). Le site 4 semble indiquer deux possibilités de trajet pour la rivière: un trajet long et méandrisé pouvant correspondre au premier lit de la rivière qui par la suite a été abandonné pour le trajet court, celui-ci correspondant à une capture. La valeur retenue pour le calcul de régression linéaire est celle du trajet long, ce qui

nous donne pour la pente une valeur de 0,519 (Figure 10) :

$$d = 0,519 \times L$$

Dans cette zone, la vitesse a été préalablement calculée (cf. partie précédente): $v = 23 \pm 2$ mm/an

or $d = v \times t$ et $L = a \times t$

on peut donc en déduire la valeur de "a" : $a = 44 \pm 4$ mm/an

Détails des résultats

Image : SPOT 1 HRV 2 264-346/O 28 Juin 90
avec traitement par ondelettes I.A.S. (Figure 8)
(Latitude N2°10-N2°20 - Longitude E98°50)

Données :

Site	d	L
1	680 m	1440 m
2	1170-1300 m	2200 m
3	900-990 m	1620 m
4	540-1350 m	2600 m
5	990 m	1930 m
6	1660 m	3230 m

(la mesure de 1350 m sur le site 4 correspondrait au trajet de la rivière lors du décrochement, la rivière ayant emprunté par la suite un trajet plus court correspondant à la mesure de $d = 540$ m.)

Calcul de régression :

Le calcul de régression à partir des valeurs de d et L donne pour la pente une valeur de 0,519 (Figure 10): $d = 0,519$
. L

Calcul de la valeur de "a":

La vitesse v est connue : $v = 23 \pm 2$ mm/an

Les équations 1,2 et 3 sont :

(1) $d = 0,519 \times L$

(2) $d = 23 \pm 2 \times t$

(3) $L = a \times t$

----> $a = 44 \pm 4$ mm/an

FIGURE 8

Extrait de l'image SPOT 264/346: agrandissement du quart Nord-Ouest et traitement par ondelettes.



FIGURE 9

Observation des rivières décalées (interprétation de la figure 8).

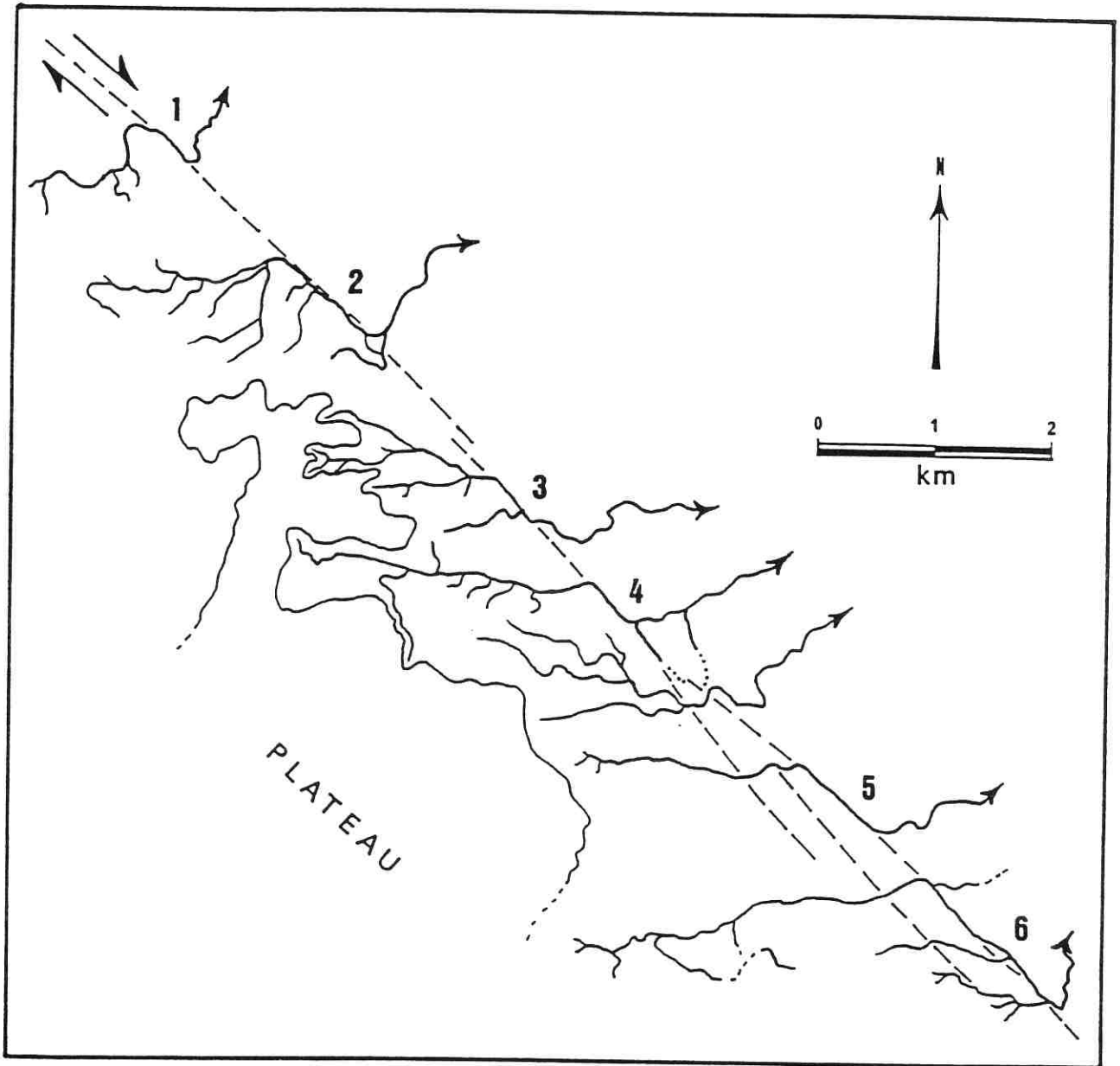
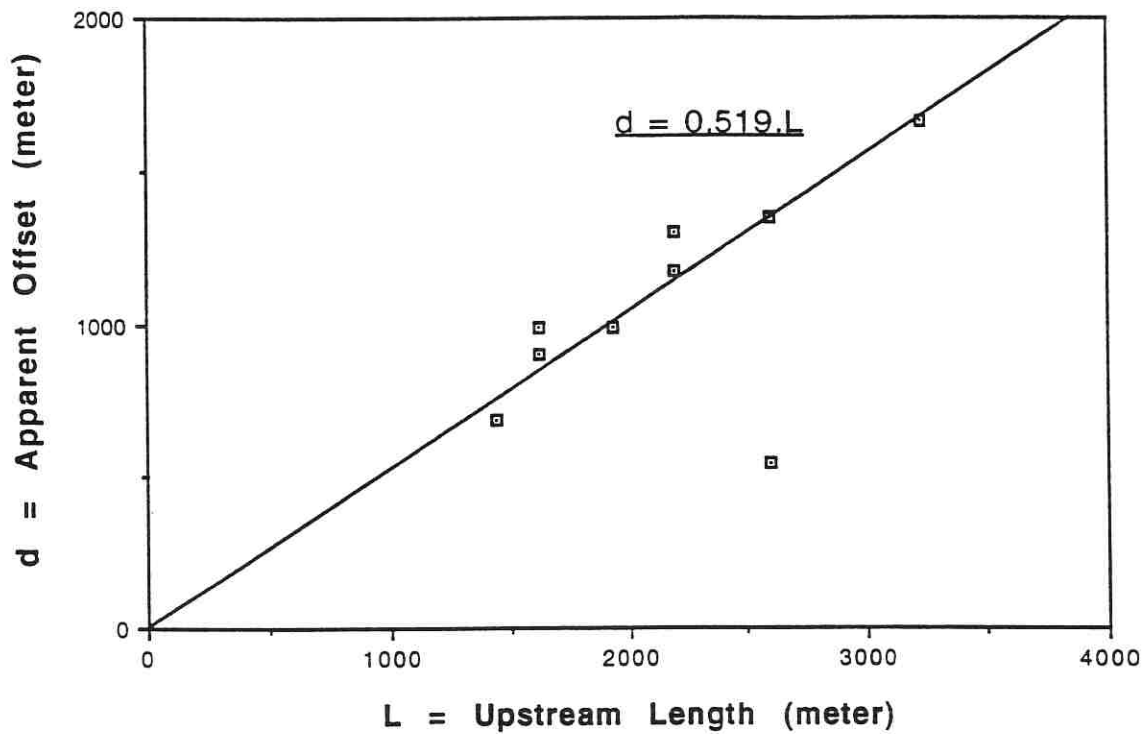


FIGURE 10

Calcul de régression linéaire à partir de la longueur de la rivière en amont de la faille (L) et du décalage apparent de la rivière au niveau de la faille (d), région du lac Toba.



$$d = \alpha \times L = 0.519 \times L$$

$$\rightarrow v = d/L \cdot a = \alpha \cdot a \Rightarrow a = 44 \pm 4 \text{ mm/yr}$$

V - CALCUL DES VITESSES LE LONG DE LA GRANDE FAILLE DE SUMATRA.

En supposant que le facteur "a" reste constant, le calcul des vitesses est effectué tout le long de la Grande Faille de Sumatra afin d'observer ou non une évolution de la vitesse de décrochement dextre.

Va - Calcul des vitesses de déformation au centre, région du lac de Singkarak (image SPOT 269-351)

A partir de l'observation d'une rivière décalée au Nord du Lac de Singkarak, et en supposant que le paramètre - a - est identique tout le long de la Grande Faille de Sumatra, on obtient une vitesse de 19 ± 2 mm/an. Cette vitesse a une valeur intermédiaire entre celle de 23 mm/an obtenue au Nord et celle de l'ordre de 10 mm/an obtenue au Sud (Bellier et al. 1991a).

Détails des résultats

Image SPOT 2 HRV 2 269-351/O du 21 Mai 90

(Latitude $S0^{\circ}20-S0^{\circ}10$ - Longitude $E100^{\circ}10-E100^{\circ}20$)

Observation d'une rivière décalée au Nord du Lac de Singkarak, dans l'extrémité Nord-Ouest de l'image. La rivière montre un décalage apparent dextre .

Données :

d = 600 m et L = 1400 m

Calcul de v:

en supposant que $a = 44\pm 4$ mm/an, les équations 1,2 et 3 donnent :

$$v = d/L \times a \quad \text{----->} \quad \text{soit } v = 19\pm 2 \text{ mm/an.}$$

Vb - Calcul des vitesses de déformation au Sud, caldeira de Ranau (image SPOT 278-360)

La relation linéaire entre "d" et "L" a été établie à partir de données mesurées sur 3 rivières décalées, au Sud de la caldeira de Ranau (Figures 11, 12 et 13). Le calcul de régression linéaire donne pour la pente, une valeur de 0,209 (Figure 14). On obtient donc une vitesse de 9 ± 1 mm/an. Cette vitesse est du même ordre de grandeur que celle préalablement obtenue grâce aux données de terrain et aux décalages des marqueurs géomorphologiques (encart bas, Figure 12) : $v = 6\pm 4$ mm/an (Bellier et al., 1991). Mais elle apporte un surcroît de précision sur la détermination de cette valeur de vitesse.

Détails des résultats

Image SPOT 1 HRV 2 278-360/O 16 Juillet 89.

(Latitude S5°00 - Longitude E104°-E104°10)

Observation de 3 rivières décalées au Sud de la Caldeira de Ranau

Données :

Sites	d	L
1	200 m	800 m
2	300 m	1000 m
3	500 m	2600 m

Calcul de régression :

Le calcul de régression donne pour la pente une valeur de 0,209 (Figure 14).

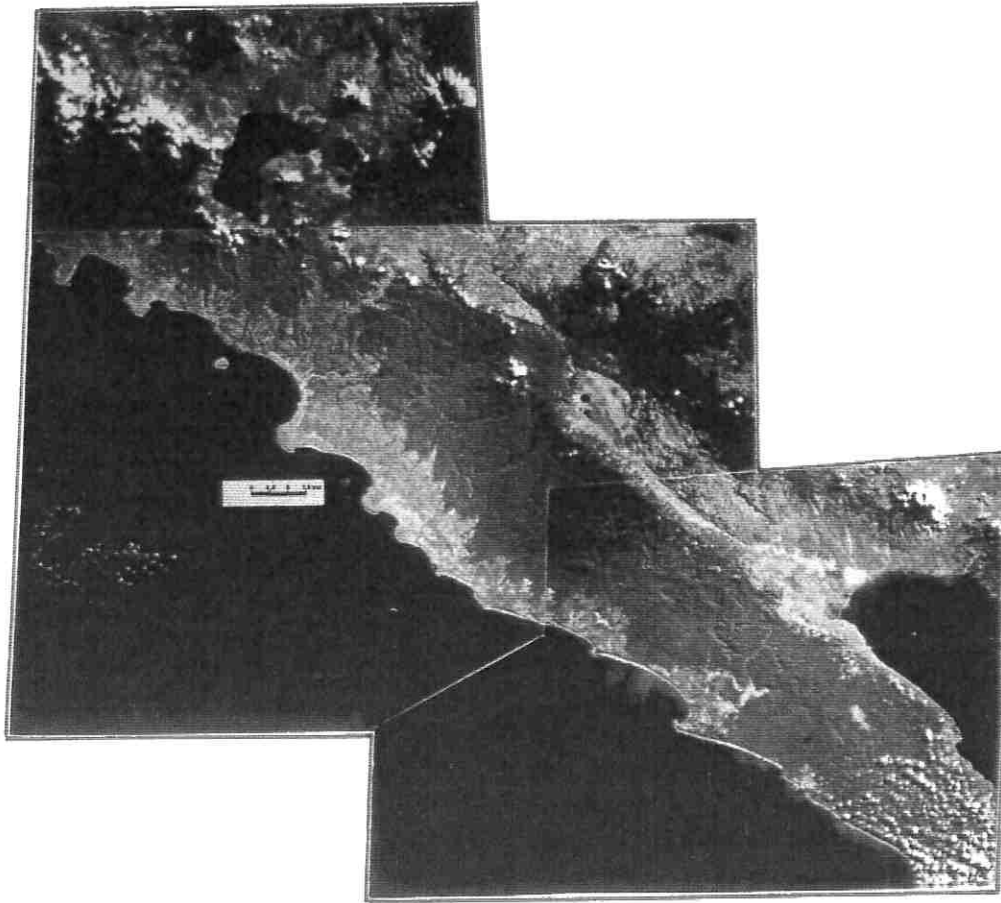
Calcul de v :

en supposant que $a = 44 \pm 4$ mm/an, les équations 1,2 et 3 donnent :

$$v = d/L \times a \quad \rightarrow \quad \text{soit } v = 9 \pm 1 \text{ mm/an}$$

FIGURE 11

Mosaïque d'images LANDSAT (scènes 133/64 et 133/63) couvrant la région du lac Ranau, en haut, et image SPOT (scène 278/360) montrant la trace active de la Grande Faille de Sumatra à travers le lac Ranau, en bas de la figure.



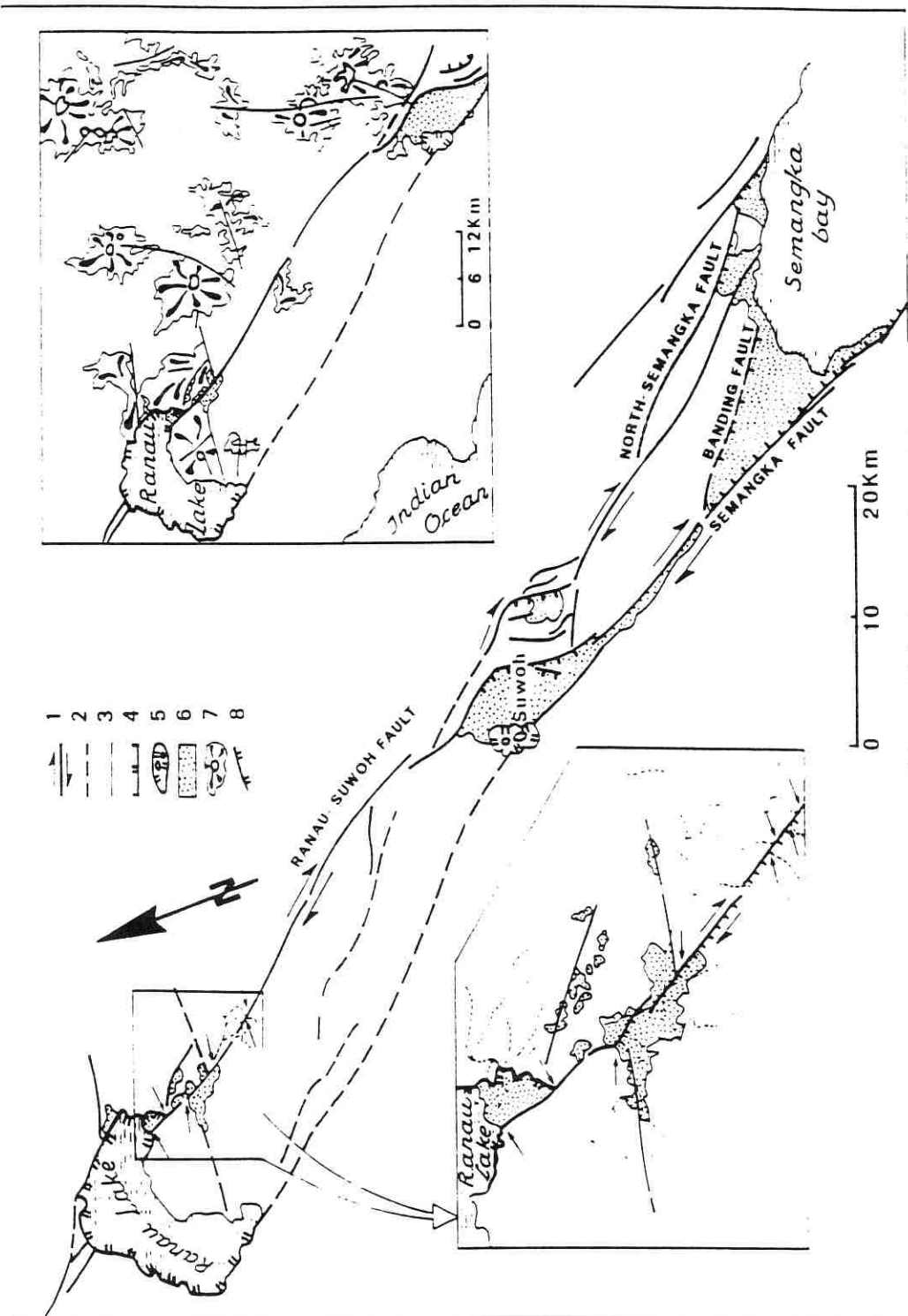


FIGURE 12

Carte structurale de la région située entre le lac Ranau et la baie de Semangka à partir de l'interprétation des images LANDSAT (scènes 133/64 et 133/63), de l'image SPOT 278/360 et des photographies aériennes.

FIGURE 13

Détail de l'image SPOT 278/360 (lac Ranau).

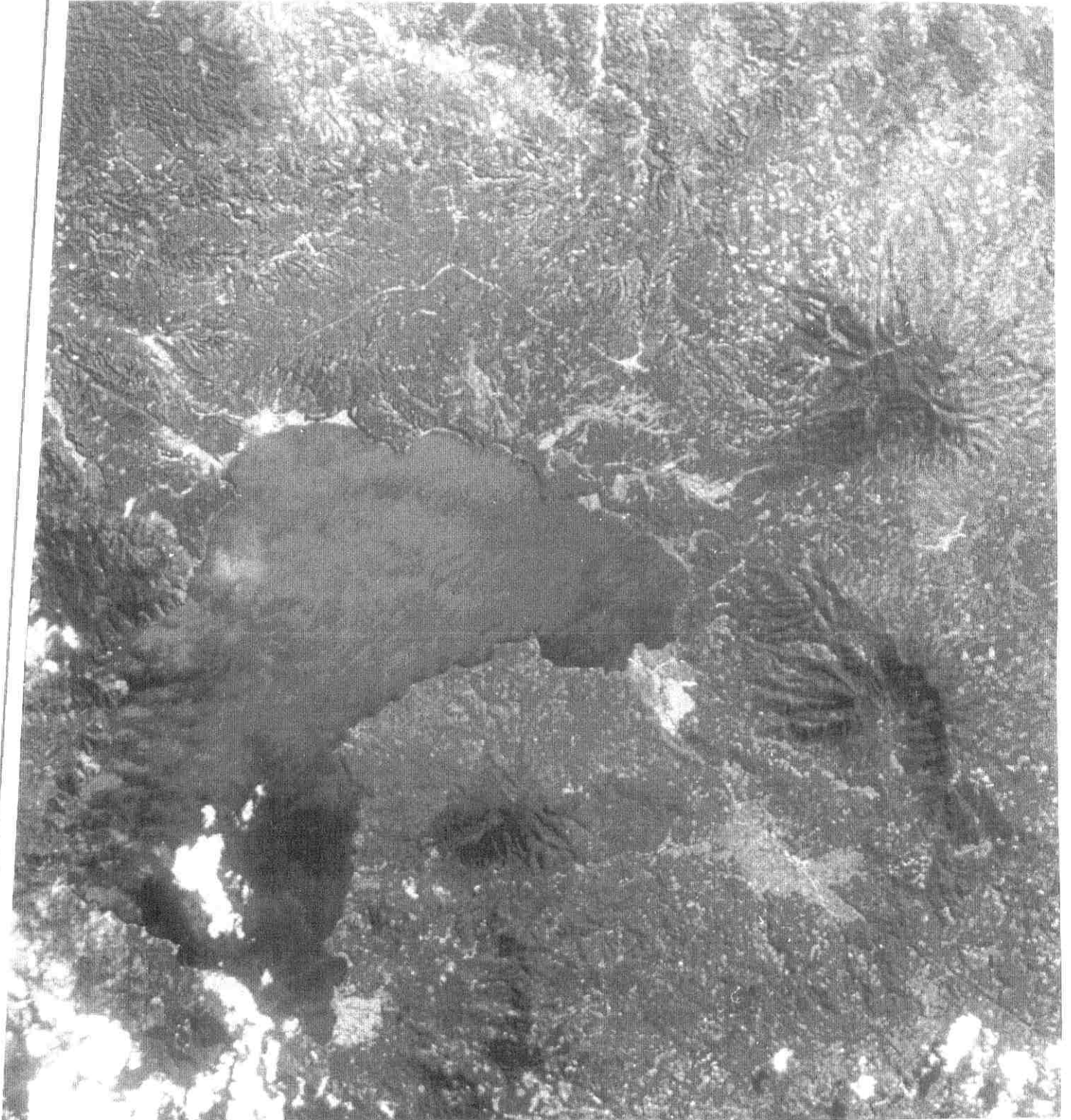
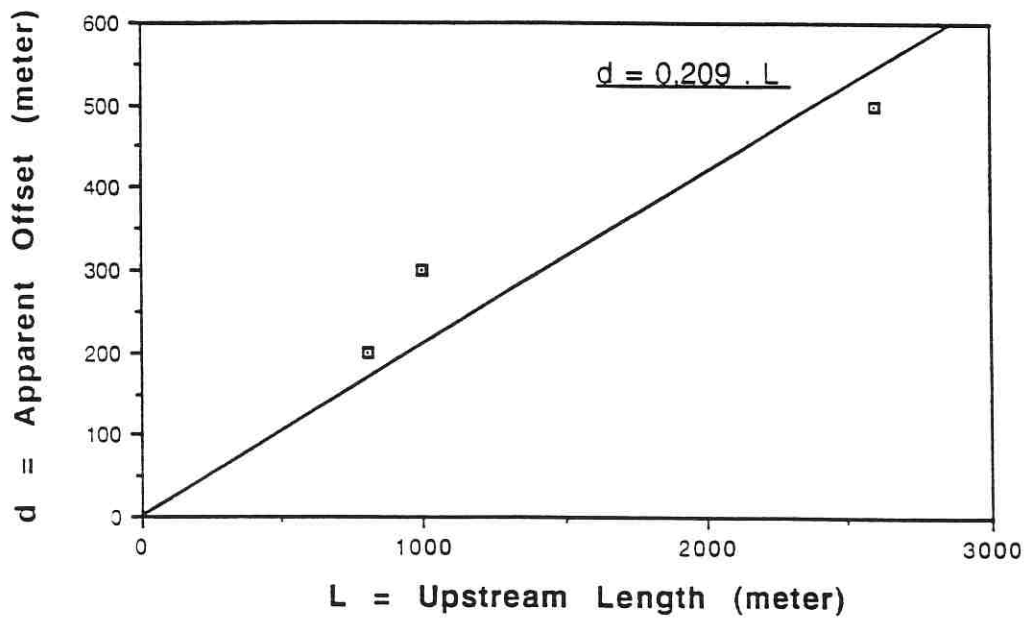


FIGURE 14

Calcul de régression linéaire à partir de la longueur de la rivière en amont de la faille (L) et du décalage apparent de la rivière au niveau de la faille (d), région du lac Ranau.



VI - CONCLUSIONS

L'utilisation de la méthode de Gaudemer et al. (1990), décrite au paragraphe III, a permis d'estimer ou de contraindre les valeurs de vitesse de décrochement le long de la faille de Sumatra. Sous climat tropical humide, le paramètre " a ", qui est la taux de croissance des rivières en amont du fait de l'érosion régressive, dépend probablement de manière prépondérante du facteur climatique. Ce paramètre déterminé préalablement a pu être utilisé tout le long de la Grande Faille de Sumatra.

Il faut cependant noter que la fiabilité de la méthode dépend du document sur lequel on peut observer les rivières décalées. Ainsi, afin de valider les résultats obtenus préalablement à partir des images SPOT à l'échelle du 1/200000, nous avons réalisé des agrandissements et des traitements des zones où l'on observe les rivières décalées (cf. les documents traités (traitement par l'ondelettes) à l'I.A.S., pour la région de Toba).

Les résultats de cette étude montrent que la vitesse du mouvement décrochant dextre observé le long de la Grande Faille de Sumatra diminue du Nord vers le Sud, respectivement de 23 ± 2 mm/an à 9 ± 1 mm/an (Figure 15). Cette diminution semble s'effectuer de manière progressive puisque nous avons obtenu une vitesse de 19 ± 2 mm/an dans la partie centrale de Sumatra. D'autre part, les modèles de géodynamique globale suggèrent des vitesses de 30 à 60 mm/an.

Pour expliquer cette diminution de la vitesse du mouvement dextre nous pourrions faire intervenir la faille de Mentawai dont la déformation pourrait accommoder une partie de la composante décrochante (Diament et al., 1992). En effet, la faille de Batee qui rejoint en mer celle de Mentawai montre un décalage dextre. Cependant, si une partie du mouvement semble "être absorber" par la faille de Mentawai, ce modèle ne peut expliquer la diminution de la vitesse le long de la Grande Faille de Sumatra du Nord vers le Sud. La campagne en mer conduite le long de l'avant-arc de Sumatra n'a pas permis de mettre en évidence d'autres failles du type de celle de Batee pouvant rejoindre en mer la faille de Mentawai et permettre un transfert progressif du mouvement.

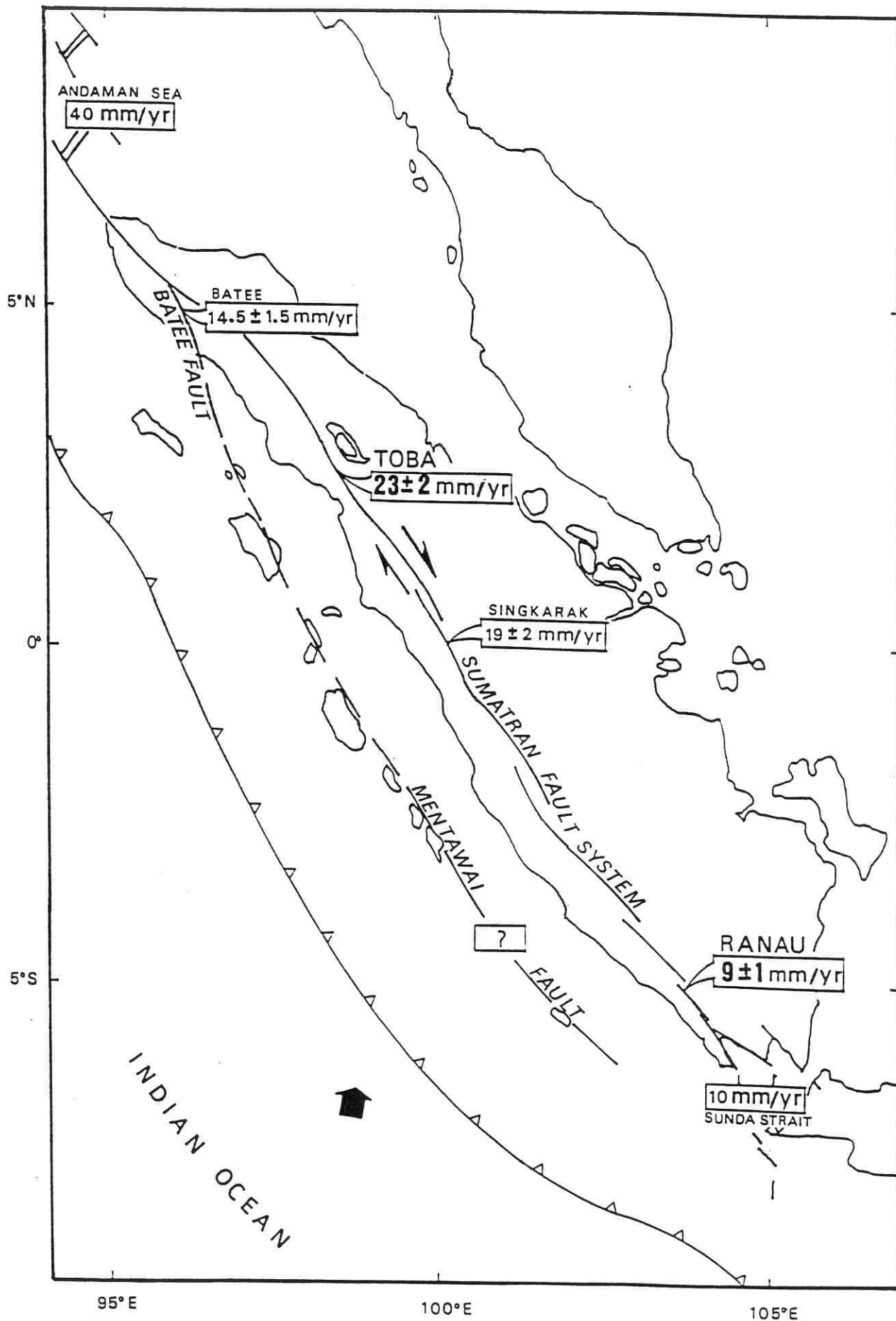
Le modèle présenté par Mc. Caffrey (Mc Caffrey, 1991) pourrait fournir une explication à ce phénomène. L'interprétation de vecteurs glissements déduits des mécanismes au foyers des séismes associés au plongement de la plaque océanique Indo-australienne sous la plaque Eurasiatique, montre que l'obliquité par rapport à la fosse augmente du Sud vers le Nord de Sumatra et induit une composante décrochante parallèle à la limite de plaques plus grande au Nord qu'au Sud. Pour accommoder cette composante, le mouvement décrochant dextre sur la Grande

Faille de Sumatra sera donc caractérisé par une diminution de la vitesse du Nord vers le Sud, avec pour conséquence l'étirement de l'avant-arc.

Toutefois l'étirement de l'avant-arc ne semble pas caractériser par des grandes structures actives. Aucune faille normale transverse importante n'a pu être mise en évidence par la géologie marine. On peut donc essayer de trouver la cause à l'amortissement de la vitesse le long de la Grande Faille de Sumatra dans l'arrière arc. En effet du raccourcissement dans l'arrière-arc pourrait également permettre d'amortir la déformation décrochante le long de la faille. Dans ce cas, l'arrière arc représenterait également une zone de tectonique active et donc de risque sismique potentiel, pouvant être engendré par les structures compressives de l'arrière-arc.

FIGURE 15

Synthèse des vitesses de déplacement dextre le long de la Grande Faille de Sumatra calculées dans le cadre de l'étude.



CONCLUSIONS SUR LES VITESSES DE DÉFORMATION

ET

L'ALÉA SISMIQUE LE LONG DE LA GRANDE FAILLE DE SUMATRA

La condition nécessaire à une définition correcte du risque sismique réside dans une bonne connaissance de l'aléa sismique. L'étude des mécanismes de failles actives et de leur vitesse de déplacement est le premier stade de cette démarche. Les travaux que nous avons réalisés le long de la Grande Faille de Sumatra, nous ont permis d'analyser en détail les caractéristiques géométriques de ce système de faille, au moins dans les zones où nous avons pu obtenir des images SPOT. Cette analyse d'images satellitaires, complétée par un contrôle de terrain, a permis d'étudier les états de contrainte associés à la Grande Faille de Sumatra et de comprendre les relations entre la Grande Faille de Sumatra et les grandes caldeiras de l'Arc volcanique de Sumatra. Ces travaux ont aussi permis de définir les caractéristiques de la segmentation de ce système de faille et de calculer la vitesse de déplacement "long-terme" de certains de ces segments. Ces résultats permettent, en conséquence, d'estimer les magnitudes maximum des séismes destructeurs associés à la Grande Faille de Sumatra ainsi que leurs intervalles de récurrence.

Géométrie de la Grande Faille de Sumatra et état de contrainte

Les études néotectoniques ont montré que la géométrie de la Grande Faille de Sumatra est caractérisée par des segments qui forment généralement des relais extensifs dextres. Ces relais correspondent à des dépressions bordées par des failles décrochantes dextres ou normales. L'analyse cinématique de ces plans de failles récents indique généralement une extension E-W à NW-SE ("pull-apart" grabens ou relais). L'extension apparaît donc oblique, et non orthogonale, à la Grande Faille de Sumatra; en conséquence, elle semble encore contrôlée par la dynamique même de ce système de faille et non par des forces gravitaires localisées dans les zones de relais. En revanche, lorsque l'on s'éloigne de la Grande Faille de Sumatra, vers l'arrière-arc ou l'avant-arc, les déformations deviennent compressives et la direction de raccourcissement est orientée NNE à NE-SW. Cependant, le long de la zone de faille, lorsque la déformation est purement décrochante, elle semble associée à une direction de compression plus proche de N-S.

Relation entre la Grande Faille de Sumatra et les grandes caldeiras

De nombreux appareils volcaniques sont localisés le long de la Grande Faille de Sumatra, suggérant une relation étroite entre la zone de faille et l'activité volcanique. En fait, l'analyse de l'évolution des zones de relais extensifs de cette Grande Faille de Sumatra illustre de façon spectaculaire le contrôle que la tectonique en décrochement exerce sur les grandes caldeiras de formes géométriques particulières (elliptiques à rectangulaires). Ainsi, nous avons pu proposer que la caldeira de Toba, la plus grande du monde, s'est localisée dans un énorme relai extensif, aujourd'hui abandonné. Des observations similaires ont pu être effectuées sur la caldeira de Ranau, tandis que la caldeira de Suwoh représente un stade précoce où le relai est encore actif et la caldeira naissante. Nos résultats montrent donc qu'un risque volcanique majeur (caldeira) peut être contrôlé par le développement d'une zone de faille décrochante.

Segmentation et Magnitude maximum

Les premiers travaux réalisés sur la terminaison méridionale de la Grande Faille de Sumatra (Faille de la Semangka) avaient permis, grâce à l'observation de tranchées, d'estimer une magnitude maximum de M_w 7,3 pour ce segment méridional. L'analyse des cartes topographiques disponibles et des images satellites, nous ont permis de préciser la segmentation de la Grande Faille de Sumatra entre le Nord du lac Toba ($3^\circ N$) et le détroit de la Sonde ($6^\circ S$). La grande majorité des **segments** ont une longueur moyenne qui est de 80 ± 10 km, quelques rares segments ont cependant des longueurs qui pourraient atteindre 130-150 km (Singkarak et Kepahiang). Dans la mesure où la segmentation est généralement marquée par des relais extensifs dans lesquels nous n'avons pas encore observé de traces de connexion entre segments majeurs, on peut donc faire l'hypothèse que les plus gros séismes ne réactivent qu'un seul segment à la fois. Par ailleurs, les données de la sismicité historique suggèrent des déplacements cosismiques de l'ordre de plusieurs mètres (2 m au moins), comparables avec ceux qui ont été observés sur d'autres zones de failles décrochantes (Californie par exemple). En conséquence, nous avons considéré que les déplacements cosismiques des tremblements de terre destructeurs étaient compris entre 2 et 4 m pour des longueurs de rupture de 80 ou 130 km. Enfin, nous avons considéré que la rupture de ces séismes majeurs s'étendait jusqu'à une profondeur de 15 km ou 20 km. Compte tenu de ce l'on connaît en Californie et des données de sismicité instrumentale disponibles sur Sumatra, une profondeur de 20 km est probablement surestimé, d'autant plus que la Grande Faille de Sumatra est localisée le long de l'Arc volcanique; on peut donc s'attendre à ce que le degré géothermique soit fort et en conséquence, à ce que la transition ductile-cassante (base de la zone sismique crustale) soit plus superficielle. Quoiqu'il en soit, pour une estimation d'aléa sismique, il est préférable de choisir des paramètres surévalués. La formule du moment sismique M_0 , calculée en utilisant : le déplacement cosismique D , la longueur L , et la profondeur h , de la rupture, permet ensuite de calculer la magnitude M_w .

Soit :

$$M_0 = \mu \cdot D \cdot L \cdot h$$

(avec $\mu = 3 \cdot 10^{11}$ dynes/cm² et 1 dyne.cm = 10⁻⁷ N.m)

et

$$M_w = (\log M_0 - 16,1)/1,5$$

On a donc :

Pour un segment de longueur 80 km :

h (km)		D (m)	2	3	4
15	M_0 (Nm)		7,20. 10 ¹⁹	1,08. 10 ²⁰	1,44. 10 ²⁰
	M_w		7,17	7,29	7,37
20	M_0 (Nm)		9,60. 10 ¹⁹	1,44. 10 ²⁰	2,37. 10 ²⁰
	M_w		7,25	7,37	7,51

Pour un segment de longueur 130 km :

h (km)		D (m)	2	3	4
15	M_0 (Nm)		1,17. 10 ²⁰	1,75. 10 ²⁰	2,34. 10 ²⁰
	M_w		7,31	7,43	7,51
20	M_0 (Nm)		1,56. 10 ²⁰	2,34. 10 ²⁰	3,12. 10 ²⁰
	M_w		7,39	7,51	7,60

Pour les segments recensés de l'équateur au Sud de Sumatra (de 0° à 6° S)

Ce sont du Nord au Sud:

- S1) Segment Singkarak-Bukitinggi-Solok : 130 km;
- S2) Segment Diatas-Nord volcan Kerinci : 80 km;
- S3) Segment Volcan Kerinci : 80 km;
- S4) Segment Danau Kerinci : 100 km;
- S5) Segment Ketahum : 90 km;
- S6) Segment Upper Musi : 150 km;
- S7) Segment Ranau : 70 km;
- S8) Segment W. Semangka : 70 km.

Pour des foyers situés à 15 km de profondeur:

D(m)	L (km)	70 (S7)(S8)	80 (S2)(S3)	90 (S5)	100 (S4)	130 (S1)	150 (S6)
2	M _o (Nm)	6,30. 10 ¹⁹	7,20. 10 ¹⁹	8,10 10 ¹⁹	9,0. 10 ¹⁹	1,17. 10 ²⁰	1,35. 10 ²⁰
	M _w	7,13	7,17	7,21	7,24	7,31	7,35
4	M _o (Nm)	1,19. 10 ²⁰	1,44. 10 ²⁰	1,62. 10 ²⁰	1,80. 10 ²⁰	2,34. 10 ²⁰	2,70. 10 ²⁰
	M _w	7,33	7,37	7,41	7,44	7,51	7,55

Pour des foyers situés à 20 km de profondeur:

D(m)	L (km)	70 (S7)	80 (S2)(S3)	90 (S5)	100 (S4)	130 (S1)	150 (S6)
2	M _o (Nm)	8,40. 10 ¹⁹	9,60. 10 ¹⁹	1,08. 10 ²⁰	1,20. 10 ²⁰	1,56. 10 ²⁰	1,80. 10 ²⁰
	M _w	7,22	7,25	7,29	7,32	7,39	7,44
4	M _o (Nm)	1,68. 10 ²⁰	1,92. 10 ²⁰	2,16. 10 ²⁰	2,40. 10 ²⁰	3,12. 10 ²⁰	3,60. 10 ²⁰
	M _w	7,42	7,46	7,49	7,52	7,60	7,64

**Tableau comparant des longueurs de failles
caractéristiques et les moments sismiques
correspondants d'après "Les tremblements de
terre" de Raoul Madariaga et Guy Perrier**

DIMENSION DE LA FAILLE ET MOMENT DES TREMBLEMENTS DE TERRE		
LONGUEUR	MOMENT	Séisme typique
1000 km	10^{24} Nm	Les plus forts séismes connus pour lesquels on dispose d'observations fiables : 23 mai 1960, Chili 28 mars 1964, Alaska
100 km	10^{21} Nm	Très fort tremblements de terre produisant de sérieux dégâts et nombreuses victimes (magnitude 8)
10 km	10^{18} Nm	Séismes de magnitude 6 provoquant des dégâts assez localisés
1 km	10^{15} Nm	Séismes de magnitude 4, ressentis localement par 4 personnes. Assez fréquents.
100 m	10^{12} Nm	Microséisme imperceptible

Les estimations que nous avons calculées montrent donc que la Grande Faille de Sumatra est susceptible de produire les magnitudes maximum suivantes :

$$M_{wmax}=7,4-7,5 \text{ pour } L=80 \text{ km et } M_{wmax}=7,6-7,7 \text{ pour } L=150 \text{ km}$$

Vitesse de déplacement "long-terme" et intervalles entre séismes destructeurs

L'analyse des images SPOT le long de la Grande Faille de Sumatra montre que sa vitesse long-terme, augmente d'environ 15 mm/an entre 5°S et 2°N de latitude. Elle passe de 10 mm/an dans l'extrême Sud de Sumatra à près de 25 mm/an au Nord dans la région du lac Toba (vers 2°N). Il est donc clair que la Grande Faille de Sumatra, de par sa longueur et sa vitesse, est une des failles actives majeures de l'Asie du Sud-Est. Si l'on prend en compte que l'aléa sismique est en gros une fonction directe de la vitesse d'une faille sismiquement active, l'aléa doit donc croître vers le Nord. D'ailleurs, la vitesse à partir du lac Toba est comparable à celle de certains segments de la faille de San Andreas en Californie.

Les déterminations de la vitesse de la Grande Faille de Sumatra permettent d'estimer approximativement l'ordre de grandeur des intervalles de récurrence entre les grands séismes destructeurs. Compte tenu des vitesses calculées près des lacs Toba (23 ± 2 mm/a) et Ranau (9 ± 1 mm/a), nous avons pu estimer les ordres de grandeur des intervalles de récurrence respectivement à **400 ± 200 ans (vers 5°S)** et **160 ± 80 ans (vers 2°N)**. Si la vitesse de 19 ± 2 mm/a, calculée près du lac Singkarak est correcte, l'intervalle de récurrence pour la partie centrale de la Grande Faille de Sumatra (région de Padang) serait de l'ordre de 200 ± 100 ans. Ces estimations sont en accord avec les données de la sismicité historique et instrumentale qui signalent plus de tremblements de terre dans la région située au Sud du lac Toba (Tapanuli-Tarutung...) que dans le Sud de Sumatra. Ces observations sont également en accord avec l'augmentation de la vitesse de la Grande Faille de Sumatra vers le Nord.

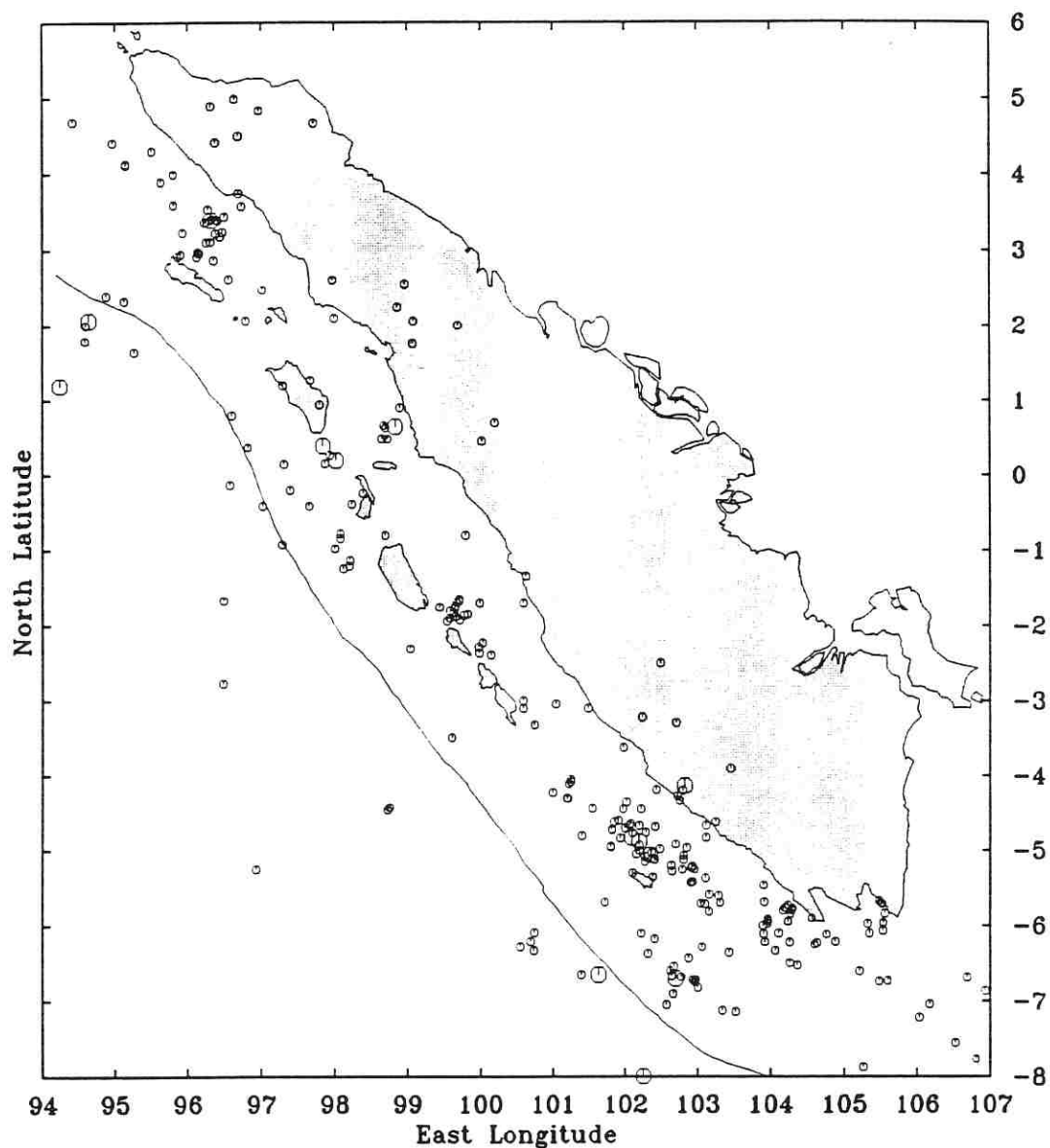
Activité sismique et segmentation

La répartition des épicentres déterminés par le réseau mondial dans la région de Sumatra (Figure 16), montre que très peu de séismes peuvent être mis en relation avec la faille de Sumatra. En effet, la majorité de l'activité sismique se situe dans la zone de l'avant-arc et correspond donc essentiellement à l'activité de la zone de subduction ou à des déformations superficielles de l'avant-arc (faille de Mentawai probablement). Cette faible activité détectée par le réseau mondial a été confirmée à plusieurs reprises au niveau de l'activité microsismique par des réseaux locaux. Ainsi, en 1991, l'équipe de Michel Diament a installé un réseau à terre dans le Sud de Sumatra, couplé avec des OBS, qui a confirmé le très faible niveau de l'activité

Figure 16 : Epicentres des séismes crustaux de Sumatra (réseau mondial)

Profondeurs des foyers < 40 km, $m_b > 5$ et déterminations par 20 stations minimum

Preliminary Determination Epicenter



microsismique. D'autre part, en 1989, lorsque nous avons réalisé les tranchées dans la partie méridionale de Sumatra, en collaboration avec le LIPI, nous avons installé pendant un mois une station sur la trace de la faille de la Semangka, et celle-ci n'avait enregistré que très peu d'événements proches. Ces données suggèrent donc que les segments de la partie méridionale de la Grande Faille de Sumatra sont bloqués et ne bougent que lors de grands séismes destructeurs tel que celui de Liwa en 1933 (cf. Troisième Partie).

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES DE LA PREMIÈRE PARTIE

- Aldiss D. T. et Ghazali S. A. (1984). The regional geology and evolution of the Toba volcano-tectonic depression, Indonesia, *J. Geol. Soc. London*, 141, 1984, p.487-500.
- BEICIP - PERTAMINA. Geological map of western Indonesia (1/2000000).
- Bellier O., (1990). - Etude tectonique du système de Faille de Sumatra (Indonésie): l'analyse de documents satellitaires (Spot, Landsat et Radar) contrainte par des données de terrain. Rapport CNES (1 Oct. 1989 -30 Mars 1990); Tome I, 28p.
- Bellier O., (1991). - Etude tectonique du système de Faille de Sumatra (Indonésie): l'analyse de documents satellitaires (Spot, Landsat et Radar) contrainte par des données de terrain - Comparaison avec les failles actives de l'Ouest des USA-. Rapport CNES (1 Mars 1990 -30 Mars 1991); Tome II, 26p.
- Bellier O., Sébrier M., et Pramumijoyo S. (1991a) - La Grande Faille de Sumatra: Géométrie, cinématique et quantité de déplacement mises en évidence par l'imagerie satellitaire. *C. R. Acad. Sci. Paris*, t. 312, série II, 1219-1226.
- Bellier O., Sébrier M., et Pramumijoyo S. (1991b) - Strike-slip faulting and volcanic calderas along the Great Sumatran fault. *Terra abstracts*, v.3, n°1, 1991a, p.266.
- Beck, Jr M.E. (1983) - On the mechanism of tectonic transport in zones of oblique subduction. *Tectonophysics*, 93: 1-11.
- Carvalo H., Purwoko, Siswoyo, Tharin M. et Vacquier V. (1980). Terrestrial heat flow in the Tertiary basin of Central Sumatra. *Tectonophysics*, 69, p.163-188.
- Chesner C.A., W. Rose W.I., DEINO A., DRAKE R. et WESTGATE J.A. (1991). Eruptive history of earth's largest quaternary caldera (Toba, Indonesia), *Geology*, 19, p.200-203.
- Curry, J.R. (1978) - Tectonic setting of the Central Sumatra Transact: Relationship to the Andaman sea (Résumé). Special issue: CCOP/SEATAR workshop on the Sumatra transact, Parapat, Indonesia.
- Daly M.C., Cooper M.A., Wilson I., Smith D.G. et Hooper B.G.D. (1991). Cenozoic plate tectonics and basin evolution in Indonesia. *Marine and Petroleum Geology*, vol.8, p.2-21.
- De Coster G.L. (1974). The geology of the Central and the South Sumatra basins. *Proceedings Indonesian Petroleum Association*.
- DeMets C. , GORDON R. G., ARGUS D. F. et STEIN S. (1990). Current plate motions, *Geophys. J. Int.*, 101, , p.425-478.
- Diament, M., Harjono, H., Dahrin, D., Deplus, C., Gérard, M., Karta, K, M., Lassal O., Mallot J., Martin, A., Zen, M.T, Jr., et "the Scientific Franco-Indonesian Team" (1990) - Mentawai cruise. Preliminary Onboard Report, 1990. 17 p. + annexes.
- Diament, M., Harjono, H., Dahrin, D., Deplus, C., Gérard, M., Karta, K, M., Lassal O., Mallot J., Martin, et A., Zen, M.T, Jr., (1991) - Deformation of the Sumatra sliver platelet, western Indonesia: Results of the Mentawai cruise. *Terra abstracts*, 3 (1), March 1991, 256.
- Diament, M., Harjono, H., Karta, K, Deplus, C., Dahrin, D., Zen, M.T, Jr., Gérard, M., Lassal O., Martin, A., et Mallot J., (1992) - Mentawai fault zone off Sumatra : A new key to the geodynamics of Indonesia. *Geology*, v.20, 259-262.
- Duquesnoy Th., Bellier O., Kasser M. et Sébrier M. (1992). Etude géodésique de la partie centrale et méridionale de Sumatra (Indonésie) : contribution à l'étude

- sismotectonique de la faille de Semangka. Rapport du programme de coopération Franco-Indonésien (DRM/Ministère de l'environnement). Publication I.G.N., n°60.405, 69pp. + Annexes.
- Earthquake Data Report (1987) - U.S. Geological Survey, 4-87: 1-138.
- Eubank R.T. et Makki A.C. (1981). Structural geology of the Central Sumatra back-arc basin. Proceedings Indonesian Petroleum Association.
- Fitch, T.J. (1972) - Plate convergence, transcurrent faults, and internal deformation adjacent to Southeast Asia and western Pacific. *J. Geophys. Res.*, 77, 4432-4460.
- Gaudemer Y, Tapponier P et Turcotte D.L. (1989) - River offsets across active strike-slip faults. *Annales Tectonicae*, Vol.III - n.2: 55-76.
- Hamilton, W. (1974) - Earthquake map of the Indonesian region. U.S. Geol. Surv. Misc. Ser. Map.1-875-C.
- Hamilton, W., (1979) - Tectonics of the Indonesian Region. United States Geological Survey Professional Paper 1078, 345 p.
- Huchon, P. and Le Pichon, X. (1984) - Sunda strait and Central Sumatra fault. *Geology*, 12, 668-672.
- Jarrard, R. D. (1986a) - Relations among subduction parameters. *Reviews of Geophysics*, 24 (2), 217-284.
- Jarrard, R. D. (1986b) - Terrane motion by strike-slip faulting of forearc slivers. *Geology*, 14, 780-783.
- Katili. J. A. (1970) - Large transcurrent faults in Southeast Asia with special reference to Indonesia. *Geol. Rundschau*, 59: 581-600.
- Katili, J. A., Sudradjat, A. et Kertapati, E. (1987) - Evidence of active transcurrent movement along the Great Sumatran fault-zone during the Tarutung earthquake of April, 1987. Abstract: VI Regional Congress of Geology, Mineral and Hydrocarbon Resources of Southeast Asia, Jakarta.
- Kieckhefer, R.M. (1980) - Geophysical studies of the oblique subduction wedge in Sumatra. Ph.D.Thesis, Univ. Calif., San Diego, 119 p.
- Lassal, O., Huchon, P. et Harjono, H. (1989) - Extension crustale dans le détroit de la Sonde (Indonésie). Données de la sismique réflexion (campagne du Krakatau). *C. R. Acad. Sci., Paris*, t.309, Série 11, 205-212.
- Lassal, O. (1991) - Evolution géodynamique de bassins sédimentaires par l'étude de la subsidence. Application au Détroit de la Sonde (Indonésie) et au bassin pétrolier "massique" (Algérie). Thèse doctorat de l'Université de Paris-Sud. Orsay, 371p.
- Malod J.A. et al. (1992). Sumenta II Cruise Report. IFREMER, INSU - CNRS, BPPT. Indonesian - French Cooperation.
- Malod J.A., Mustafa Kemal B., Beslier M.O., Deplus Ch., Diament M., Karta K., Mauffret A., Regnault H., Aritonang P. et Zen M.T. Jr. (1993). Déformations du bassin d'avant-arc au Nord-Ouest de Sumatra: une réponse à la subduction oblique. *C.R. Acad. Sci. Paris, Ser. II*, 316, p.791-797.
- McCaffrey R. (1991). Slip vectors and stretching of the Sumatran fore-arc, *Geology*, 19, p.881-884.
- Minster, J. B. et Jordan, T. H. (1978). Present-day plate motions. *J. Geophys. Res.*, 83, 5331-5334.
- Mount V.S. et Suppe J. (1992). Present-day stress orientations adjacent to active strike-slip faults: California and Sumatra. *J. of Geophys. Res.*, vol. 97, n°B8, p.11995-12013.
- Pramumijoyo, S. (1991) - Néotectonique et sismotectonique de la terminaison méridionale de la grande faille de Sumatra et du détroit de la Sonde (indonésie). 27 Juin 1991, Thèse Université Paris Sud, 215 p.
- Pramumijoyo, S. et Sébrier, M. (1989) - Fault kinematics around the Sunda strait, Indonesia. Abstract. *Terra Abstracts*, 1 (1), March 1989.
- Pramumijoyo, S., Sébrier, M., et Bellier O. (1990) - Variation du régime tectonique miocène à actuel associé à la faille de Sumatra, RST, Grenoble, Avril 1990.
- Pramumijoyo S. et Sébrier M. (1991) - Neogene and Quaternary fault kinematics around the Sunda strait, Indonesia, *Journ. SE Asian Earth Sc.*, (sous press).
- Rangin Cl. et al. (199). The quest for Tethys in the western Pacific. 8 paleogeodynamic maps for Cenozoic time. *Bull. Soc. Géol. France*, vol. VI, n°6, p.907-913.

- Sébrier M, Pramumijoyo S. et Bellier O. (1989) - Etude néotectonique de la faille active de Semangka (Indonésie) : utilisation de la méthode des tranchées en domaine tropical humide. Rapport du programme de coopération Franco-Indonésien (DRM/Ministère de l'environnement).129p.
- Sébrier M, Bellier O. et Pramumijoyo S. (1991) - Late cenozoïc fault kinematics within the southernmost region of the Great Suamatra fault - Indonesia. Terra abstracts, 3 (1), March 1991.
- K. Sieh, Rais J. et Bock Y. (1991). Neotectonic and paleoseismic studies in West and North Sumatra, AGU Fall Meeting, EOS, 72, n°44, p.460.
- Suryanto U. et Wycherly W.A. (1984). A high resolution seismic stratigraphy study Central Sumatra basin Indonesia. Proceedings Indonesian Petroleum Association.
- Tapponnier, P., Peltzer, G., Le Dain, A.Y., Armijo, R. et Cobbold, P., (1982) - Propagating extrusion tectonics in Asia: New insights from simple experiments with plasticine. *Geology*, 10, 611-616.
- Untung, M., Burg, N., Kertapati, E., Undang, et Allen, C.R. (1985) - Rupture along the Great Sumatran fault, Indonesia, during the earthquakes of 1925 and 1943. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 75, 313-317.

DEUXIÈME PARTIE

ETUDE GEODESIQUE DE LA PARTIE
CENTRALE
ET MERIDIONALE DE SUMATRA (INDONESIE)

:

CONTRIBUTION A L'ETUDE
SISMOTECTONIQUE DE LA GRANDE FAILLE
DE SUMATRA

RÉSUMÉ

Deux réseaux géodésiques situés dans les parties centrale et méridionale de l'île de Sumatra et constitués respectivement de 12 et 9 stations (les réseaux de Singkarak et Ranau) furent déterminés par l'intermédiaire de mesures de distances par télémétrie laser et de mesures GPS. Cette première campagne de mesures s'est déroulée en Juillet-Août 1991 le long du système actif de la faille de Sumatra, pour laquelle les vitesses maximales de déplacement dextre, sont de l'ordre du centimètre par an.

Ce réseau permettra, lors de la réitération des mesures au cours d'une campagne future (en 1995 ou 1996), de localiser et d'estimer l'importance relative des déplacements horizontaux sur chacun des segments actifs de la faille.

Ce rapport présente le contexte de l'étude ainsi que les moyens mis en oeuvre pour la réalisation de ces réseaux dans le cadre du programme Franco-Indonésien d'étude sismotectonique de Sumatra. Et, il permet de faire le point sur les résultats actuels de cette première campagne géodésique.

1 - CADRE GEODYNAMIQUE DE LA GRANDE FAILLE DE SUMATRA

1-a : Cadre géodynamique général

Dans le cadre de la tectonique des plaques, l'arc indonésien se situe dans une zone d'interaction entre 3 plaques majeurs, i. e., la plaque eurasiatique, la plaque indo-australienne et la plaque pacifique (Fig. 1). Par rapport à la plaque eurasiatique, supposée fixe, la plaque indo-australienne a un mouvement relatif vers le Nord, tandis que la plaque pacifique a un mouvement relatif vers l'Ouest-Nord-Ouest (e.g., Minster et Jordan, 1978 et Hamilton, 1979). La convergence entre les plaques indo-australienne et le bloc sud-est asiatique (Sundaland) de l'Eurasie, est marquée actuellement par une système de subduction continue : Birmanie-Andaman-Sonde-Banda, concentrique, typique d'une marge continentale active (Hamilton, 1979).

1-b : La Grande faille de Sumatra

La Grande Faille de Sumatra est un système de faille en relais d'environ 1650 km de long (Fig. 2) et est orientée approximativement NW-SE, parallèlement à l'axe principal de Sumatra. Cette faille s'étend le long de l'arc volcanique actif de Sumatra, relie le bassin d'arrière-arc de la mer d'Andaman au Nord-Ouest (Rodolfo, 1969) et le détroit de la Sonde au Sud-Est où la transition entre les convergences oblique de Sumatra et normale de Java se produit (Fig. 2 et 3). Elle se traduit dans le paysage par une suite de dépressions allongées au milieu de la chaîne montagneuse de Barisan. Ces dépressions allongées correspondent à des zones de relais en extension (ou grabens) qui sont disposées tout le long de Sumatra.

Le mouvement dextre de cette faille est supposé accommoder la composante décrochante de la convergence oblique qui ne peut pas être prise en compte par la subduction (Jarrard, 1986a; 1986b; Beck, 1983; Hamilton, 1979; Fitch, 1972). Elle serait donc responsable de la migration vers le Nord-Ouest de la partie occidentale de Sumatra par rapport au reste de l'île (Huchon et Le Pichon, 1984). Par conséquent, elle devrait transférer l'ouverture du bassin d'Andaman vers le détroit de la Sonde. Actuellement ce détroit est caractérisé par une zone en extension, sismiquement active et caractérisée par des mécanismes au foyer de séisme de type faille normale qui indiquent une extension de direction approximative N 130°E (Harjono et al., 1988; 1991; Lassal, 1991; Lassal et al., 1989).

La vitesse de déplacement de la Grande Faille de Sumatra est mal connue et a seulement été estimée sur la base des modèles de géodynamique globale entre 30 et 50 mm/a (Jarrard; 1986a et 1986b).

Au Nord de Sumatra, la vitesse d'ouverture du bassin d'Andaman est d'environ 40 mm/a. Il s'est étiré de 460 km depuis 13 Ma (Curry, 1978; Curry et al., 1982; Curry, 1989). Si l'on considère que l'ouverture de la mer d'Andaman est transformée par la faille de Sumatra, cette dernière a donc dans sa portion septentrionale une vitesse de déplacement dextre de 40 mm/a environ. En revanche, au Sud de Sumatra, l'ouverture du détroit de la Sonde est seulement 50 à 70 km depuis 5 à 6 Ma (Lassal et al., 1989; Lassal, 1991), ce qui implique une vitesse d'ouverture maximale de 10 mm/an. La vitesse de déplacement nécessaire le long de la partie septentrionale de la Grande Faille de Sumatra est donc inférieure à 10 mm/a. Il faut par conséquent amortir au moins 30 mm/a de déplacement horizontal sur la faille entre le Nord et le Sud de Sumatra (Bellier et al., 1991a; Pramumijoyo, 1991; Diament et al., 1992).

FIGURE 1

Cadre géodynamique de l'Indonésie (d'après Jolivet et al., 1989)

les étoiles indiquent les zones étudiées

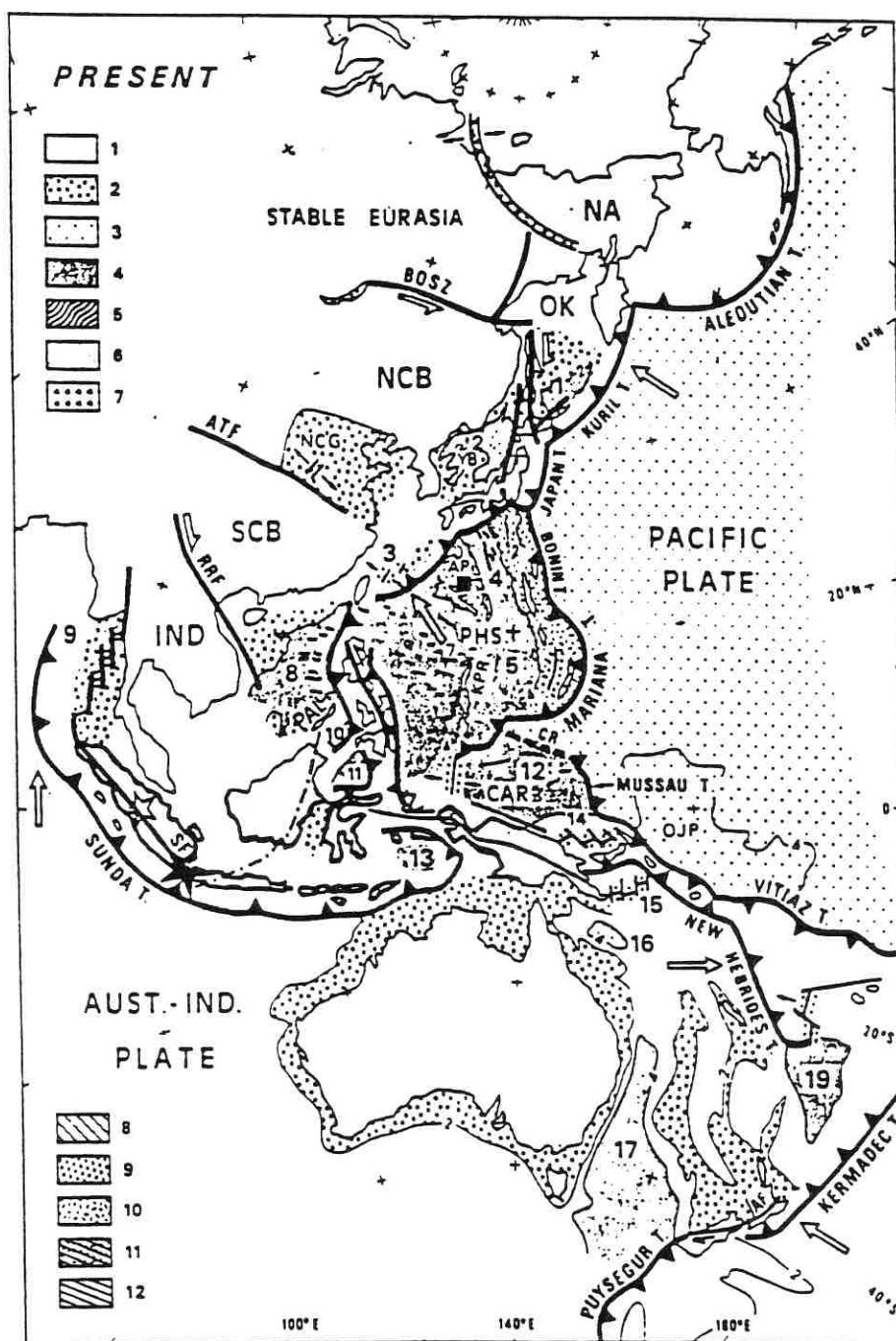


Fig. 1. Geodynamics of the Western Pacific region. Oblique Mercator projection (pole: 0° N, 50° E). 1 to 19: marginal basins. 1—Kurile basin, 2—Sea of Japan, 3—Okinawa basin, 4—Shikoku basin, 5—Parece Vela basin, 6—Mariana basin, 7—West Philippine basin, 8—South China Sea, 9—Andaman Sea, 10—Sulu Sea, 11—Celebes basin, 12—Caroline basin, 13—Banda Sea, 14—Bismark rift, 15—Woodlark rift, 16—Coral Sea, 17—Tasman Sea, 18—North Fiji basin, 19—South Fiji Basin. OK—Okhotsk plate, NCB—North China block, SCB—South China block, IND—Indochina block, AP—Amami plateau, KPR—Kyushu-Palau ridge, CR—North Caroline ridge, OJP—Ontong Java plateau. BOSZ—Baikal-Okhotsk shear zone, HTSZ—Hidaka-Tartary shear zone. ATF—Altyn-Tagh fault, RRF—Red River fault, SF—Sumatra fault, AF—Alpine Fault. Black squares in the PHS plate are DSDP sites (445-north, 292-south). Patterns 1 to 12: 1 = emerged continental crust, 2 = stretched continental crust, 3 = Pacific plate, 4 = marginal basins oceanic crust (extinct), 5 = Molucca Sea oceanic crust (only on the 12 Ma stage), 6 = marginal basins oceanic crust (active spreading), 7 = AUS-ANT plate oceanic crust, 8 = ANT plate oceanic crust, 9 = New Guinea plate oceanic crust, 10 = crust of the Bonin arc and Kyushu-Palau ridge, 11 = same as 10, now subducted, 12 = subducted part of the Shikoku basin.

FIGURE 2

Schéma structural de l'arc et de l'avant arc de Sumatra.

- GFS marque la faille de Sumatra montrant les zones de relais en extension

- MFS marque la faille de Mentawai.

Les cadres délimitent les zones d'études : A- la région du lac de Ranau et B- la région du lac de Singkarak.

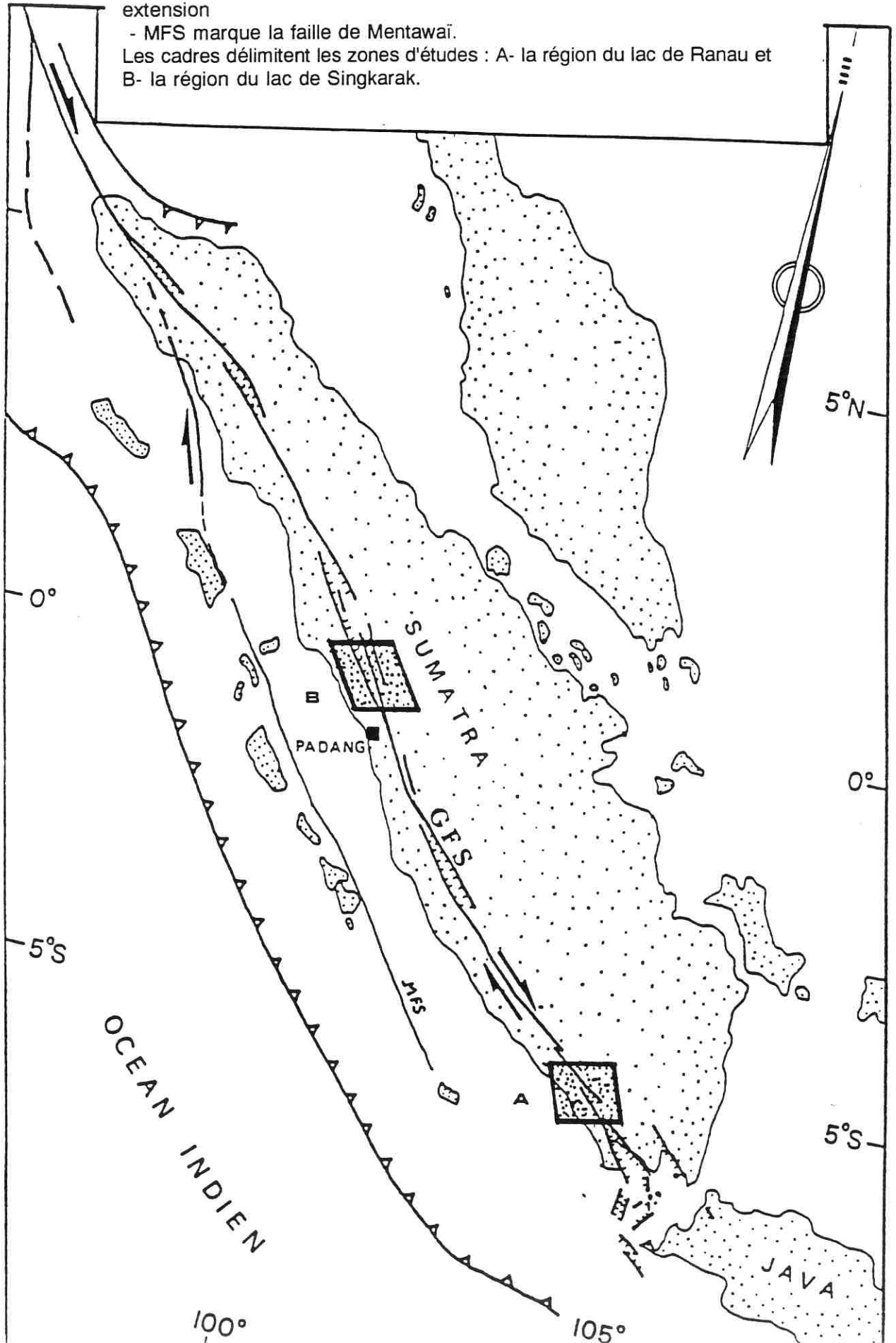
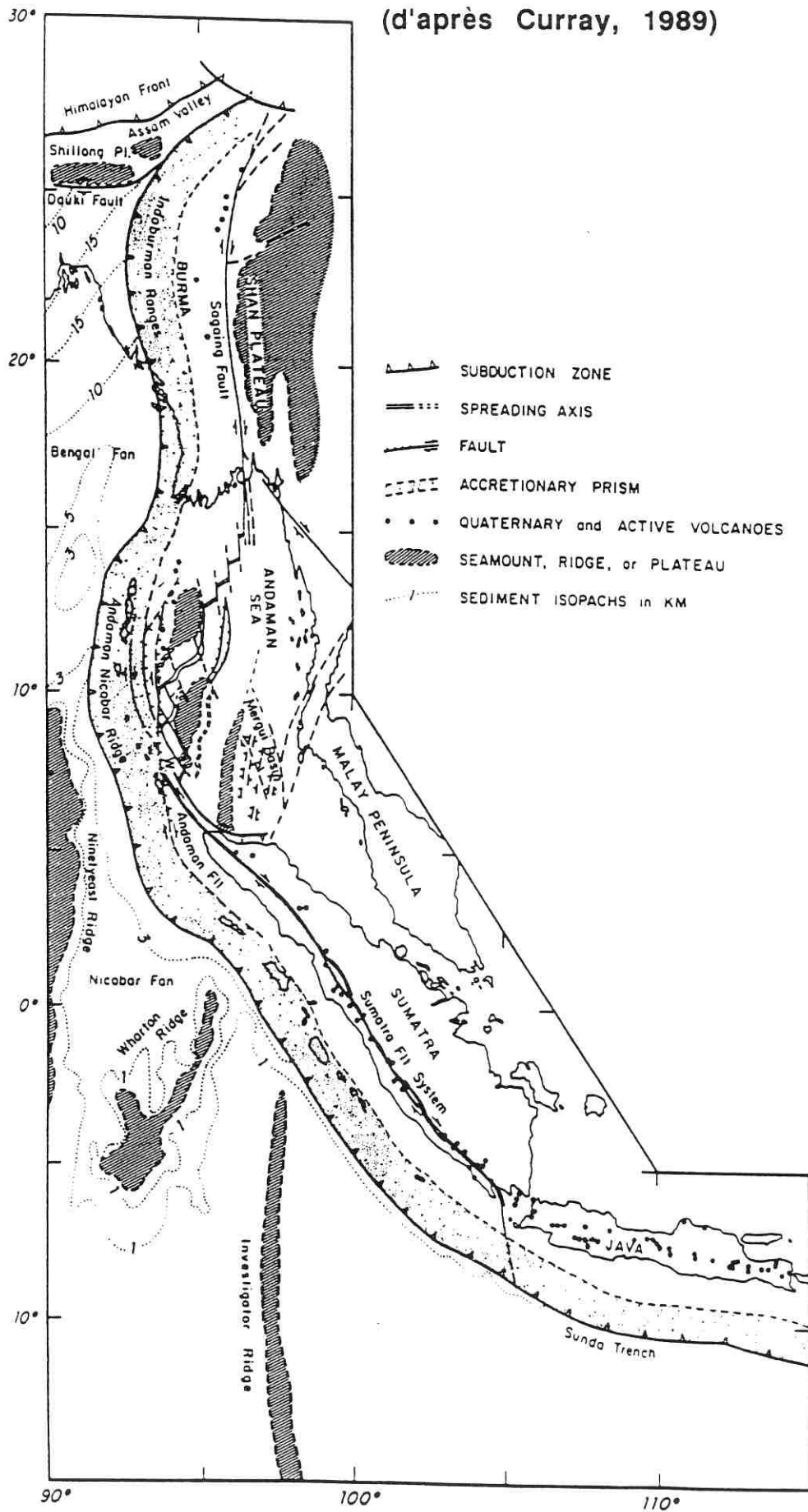


FIGURE 3

Cadre géodynamique de la Faille de Sumatra
(d'après Curray, 1989)



1 -c : Objectif de l'analyse géodésique

L'étude du risque sismique se trouve nettement améliorée par la connaissance du mécanisme des failles et de leur vitesse de déplacement.

Les techniques de positionnement GPS permettent aujourd'hui de mesurer des réseaux de points avec une précision centimétrique. Ces techniques permettent également à posteriori de calculer des vitesses de déformations horizontales de l'ordre de 1 ppm (partie par million); ce qui équivaut pour les réseaux qui nous concernent (décakilométriques) à des précisions de l'ordre du centimètre.

Les résultats encourageants obtenus jusqu'alors sur la cinématique de la faille de Sumatra, les régimes tectoniques et les vitesses de déplacements transcurrents, nous incitent à poursuivre cette étude et notamment pour mieux caractériser la déformation instantanée de la faille de Sumatra d'avoir recours à une étude géodésique. Cette analyse permettra de vérifier si la composante d'ouverture (extension) se concrétise sur tous les segments de la faille et d'en estimer les rejets horizontaux. Cette étude permettra en outre de confirmer les valeurs faibles de la vitesse de déplacement sur la portion méridionale de la grande faille de Sumatra (A- Fig.2) et de préciser si les vitesses dans la partie centrale (B- Fig.2) sont du même ordre de grandeur. Cette expérience de géodésie qui a débuté lors de la campagne effectuée durant l'été 1991 devraient donc contribuer à préciser les paramètres de la déformation instantanée de la Grande Faille de Sumatra. Cette expérience comprend deux volets complémentaires : (1) une étude de géodésie terrestre (trilatération = géodésie par mesure de distance) et (2) une étude de géodésie spatiale par GPS (Global Positioning System).

Cette première expérience géodésique a pour but : (1) de compléter le réseau d'un vaste programme Américain de surveillance géodésique de la zone de subduction de la Sonde de Java à Sumatra, par l'installation de deux petits réseaux de surveillance géodésique (classique et GPS); (2) de contraindre les vitesses de déformation au niveau de deux zones cruciales de la failles de Sumatra, la zone du lac de Ranau (A, sur Fig.2) et la zone du lac de Singkarak (B, sur Fig.2).

2 - METHODOLOGIE DES MESURES GEODESIQUES

La géodésie permet de déterminer la forme de la terre. Elle a pour objet de mesurer ses dimensions et l'établissement d'un réseau de points d'appui pour la réalisation de cartes. Les moyens de mesure sont variés. Ils sont classés dans deux catégories : la géodésie classique et la géodésie spatiale (voir par exemple: Duquesnoy et al., 1992; Equipe sismotectonique Franco-Philippine, 1991).

2-a : La géodésie classique ou terrestre

2-a.1 : Le principe de la géodésie terrestre : la triangulation et la trilatération

En géodésie classique, la position d'un point de la surface terrestre est déterminée, dans le référentiel géodésique utilisé, par des mesures d'angles (triangulation) et de distances (trilatération).

En triangulation, les angles de triangles sont mesurés au moyen de théodolites, la mise à l'échelle du réseau étant issue de la mesure d'au moins une distance.

En trilatération, les distances sont mesurées à l'aide de distancemètres ou télémètres laser (e.g., Kasser). Dans le cas le plus répandu, le principe est de mesurer le déphasage entre la modulation très stable d'une onde monochromatique émise par l'appareil placé sur l'un des points du réseau, et de l'onde reçue après réflexion sur un prisme disposé sur un autre point. La distance est calculée en fonction de la vitesse de propagation dans l'air, variable suivant l'indice de l'air, lui-même déterminé à partir des mesures météorologiques à chaque extrémité de la visée.

Dans les deux cas, triangulation et trilatération, les mesures sont projetées sur une surface de référence. On parle de géodésie bi-dimensionnelle. Cette projection nécessite de connaître par ailleurs l'altitude relative des points du réseau géodésique. Dans notre cas, les mesures de dénivelées ont été effectuées par des zénithales réciproques et simultanées permettant de s'affranchir des problèmes de réfraction atmosphérique. Pour des réseaux de plusieurs kilomètres, les mesures de distances apportent en général une meilleure précision que la triangulation, ce qui les rend préférables.

2-a.2 : Les inconvénients de la géodésie terrestre

Les principaux problèmes liés à l'utilisation des méthodes de géodésie terrestre tiennent aux contraintes d'intervisibilité entre les points. Cette condition impose : (1) de bonnes conditions météorologiques ; la présence de nuages, de brumes ou de brouillards rend les mesures délicates, voire impossibles. En pays tropical humide, les conditions météorologiques sont très souvent défavorables. La plupart du temps, les mesures de distances excédant 10 km sont délicates à Sumatra; (2) une localisation des points permettant un maximum de visées sur les points géodésiques proches. Cette condition implique généralement un positionnement des stations sur des points hauts découverts, ce qui complique singulièrement les mesures dans les régions où les accès sont difficiles et où le couvert végétal est dense.

2-a.3 : La précision de la géodésie terrestre

La précision d'une mesure de distance peut s'écrire sous la forme $s = (a^2 + b^2L^2)^{1/2}$ (Savage et Prescott, 1973) avec a , erreur constante de l'ordre de 3 mm et b erreur proportionnelle

de l'ordre de 10^{-6} . Ce dernier facteur vient essentiellement de l'impossibilité de supprimer complètement l'effet de la réfraction atmosphérique.

Dans la phase ultime des calculs, une analyse des résidus et/ou de la matrice de covariance après compensation permet de donner une bonne estimation de la précision globale réelle de la détermination des positions relatives des points du réseau.

2-a. 4 : Les mesures de géodésie classique à Sumatra

Les mesures ont été effectuées au distancemètre RANGE MASTER III. Plusieurs distances ont été mesurées à chaque opération à partir d'une même station du distancemètre. Les mesures ont été effectuées de jour. Chaque équipe sur les points visés était chargée de positionner et d'orienter les réflecteurs et de relever les informations météorologiques. La coordination des opérations s'est effectuée par l'intermédiaire de talky-walkys.

2-b : La géodésie spatiale : Le système de positionnement GPS

2-b.1 : Le principe du système de positionnement GPS

En géodésie spatiale, la position d'un point sur la surface de la Terre est déterminée par rapport à des points situés en dehors du voisinage immédiat de la Terre. Ces points peuvent être des satellites artificiels, des sources galactiques ou extragalactiques, ou des appareils posés à la surface de planètes du système solaire. Le moyen le plus souple d'emploi et le moins coûteux est constitué par les satellites artificiels.

Le système GPS (Global Positioning System) a été mis au point par les militaires américains et est réellement opérationnel depuis la fin des années 80. Il est composé de 3 segments:

- Le segment spatial : Un ensemble de 21 satellites répartis sur 6 plans orbitaux, gravitant à une altitude d'environ 20000 km et ayant une période de révolution de 12 h. Ces caractéristiques permettent de capter à toute heure et en tout point du globe un minimum de 4 satellites.
- Le segment de contrôle, composé de points d'appui permettant la poursuite des satellites.
- Le segment utilisateur, composé des récepteurs installés au sol.

Le message GPS :

Chaque satellite émet ces messages sur deux fréquences $L1 = 1.57542$ GHz et $L2 = 1.2276$ GHz. De par l'origine militaire du système GPS, ces fréquences sont modulées

par deux codes : C/A sur L1, accessible à tout utilisateur et P sur L1 et L2, accessible qu'à certains utilisateurs. Le message contient des informations sur la position et sur les paramètres d'horloge des satellites ainsi que l'heure d'émission du message.

Le système de mesure :

Le principe de la mesure est basé sur le temps de trajet mis par l'onde porteuse pour aller du satellite au récepteur. Cette distance est égale à la différence entre l'heure de réception et l'heure d'émission du satellite multipliée par la vitesse de la lumière. Connaissant la position du satellite, il serait théoriquement possible de déterminer la position du point au sol avec trois satellites si le temps était parfaitement connu. Comme le temps n'est pas connu, il est nécessaire de capter en permanence au moins quatre satellites. Si la réception d'un quatrième satellite permet d'avoir une approximation des décalages d'horloge des satellites et du récepteur, la précision obtenue par cette méthode est de l'ordre de la dizaine de mètre ce qui est nettement insuffisant pour nos applications.

C'est donc une méthodologie différente, utilisant ce système en mode différentiel et basée sur un asservissement de la phase qui est appliquée en géodésie et en géophysique. En effet, l'accès à la distance satellite-récepteur est possible par l'intermédiaire de la phase de la porteuse. Si on ne tient pas compte des erreurs d'horloge, cette distance est égale au nombre entier de cycles plus la fraction de cycle mesurée multiplié par la longueur d'onde du signal $([N + F] * \lambda)$. On s'affranchit des erreurs de décalages d'horloge par combinaison linéaire entre deux satellites et deux récepteurs (Mesures différentielles). Cette combinaison linéaire est appelée doubles différences. Les nombres entiers de cycles sont des inconnues du problème.

Cette méthode permet d'obtenir une précision centimétrique sur la position relative de deux stations de réception.

Les sources d'erreurs résiduelles sont les suivantes :

- La connaissance de la position des satellites. Cette position est nécessairement imprécise; imprécision de l'ordre de la dizaine de mètres pour les éphémérides radiodiffusées. Lorsqu'on recherche la précision maximale, on est amené à stationner avec des récepteurs un jeu de points connus avec une bonne précision dans un référentiel mondial (eux-mêmes obtenus par d'autres méthodes spatiales -radioastronomiques ou mesures de distances Terre / satellites avec un télémètre laser très puissant). On recalcule alors à posteriori la position exacte des satellites.

- La connaissance de l'indice de réfraction des derniers kilomètres de l'atmosphère : sa valeur que nous ne pouvons pas connaître parfaitement, s'élimine en partie lorsque les deux récepteurs sont à la même altitude et dans des conditions climatiques proches.

- La connaissance du contenu électronique de l'ionosphère. Pour les ondes radio, l'ionosphère est une couche très perturbatrice. Le signal qui s'y propage est ralenti en fonction de la teneur locale en charges libres et de la fréquence du signal. Lorsqu'on recherche la précision maximale, en recevant les deux fréquences émises et en comptant les temps de propagation sur ces deux canaux, on sait éliminer l'essentiel de cet effet.

Deux sécurités ont été ajoutés par les militaires américains et affectent la précision des résultats :

- La "Selective Availability" (SA) qui consiste en une diminution de la précision des orbites radiodiffusées et une perturbation de la fréquence d'horloge des satellites.

- L'"AntiSpoofing" (AS) qui est une modification du code P en code Y qui lui n'est accessible qu'à des utilisateurs autorisés.

2-b. 2 : Inconvénients et avantages du GPS

Le principal avantage de la géodésie spatiale sur la géodésie classique est l'élimination de la contrainte d'intervisibilité entre les points d'un réseau géodésique qui englobe les problèmes de temps, de météorologie (précipitations, brumes, nuages, fortes températures) et d'environnement (relief, végétation, plan d'eau). Elle permet donc de mesurer des réseaux de toutes tailles (de 0 à quelques milliers de kilomètres), à tout moment de la journée et en tout lieu de la terre en s'affranchissant des problèmes de météorologie et de visibilité directe.

Cependant, le GPS utilise des signaux venus de l'espace. Par conséquent son utilisation en zone masquée (forêt, vallée encaissée, zone urbaine) est limitée.

2-b. 3 : La précision du GPS

La technicité actuelle permet de mesurer des réseaux de quelques kilomètres avec une précision de l'ordre du centimètre avec des appareils monofréquences et des moyens de calcul modérés (logiciels fournis par les fabricants de matériel).

L'utilisation de récepteurs bifréquences peuvent permettre de mesurer des réseaux de plusieurs centaines de kilomètres avec une erreur subcentimétrique. Les performances des mesures GPS en relatif sont de l'ordre du ppm (partie par million = 10^{-6}). C'est à dire que le système est capable de mesurer une distance de 10 km avec une précision de l'ordre du centimètre moyennant les conditions suivantes : (1) la redondance des mesures, obtenue en effectuant des mesures sur une période qui correspond à la durée de la session (quelques heures), et un contrôle en réitérant les sessions sur une même base; (2) la combinaison linéaire entre les données GPS qui s'effectuent à partir d'un minimum de 2 récepteurs et de 4 satellites.

2-b. 4 : Le déroulement des mesures GPS à Sumatra

Une station GPS se compose d'une antenne et d'un récepteur alimenté par une batterie 12 volts. Le point le plus délicat d'une mesure GPS sur le terrain, est le positionnement de l'antenne par rapport au point géodésique matérialisé stationné. Lors de la session, la principale contrainte est l'heure du début des mesures (les mesures de tous les récepteurs doivent être synchrones) et la prise des données météorologiques.

L'heure de la session est déterminée par la constellation de satellite et sa configuration connue d'après les éphémérides. Pendant la campagne, la configuration de la constellation de satellites permettait deux sessions de mesure: une première de jour (entre 9h30 et 14h30) et une deuxième de nuit (entre 21h30 et 2h30) .

Les données sont automatiquement stockées dans la mémoire du récepteur pendant la session de mesure. Le contenu de la mémoire est ensuite transféré par l'intermédiaire d'un logiciel de transfert dans celle d'un micro-ordinateur. Les données sont enfin stockées sur disquettes.

3 - DEROULEMENT ET ORGANISATION DU PROGRAMME GEODESIQUE

La mission s'est déroulée du 14 Juillet au 21 Août 1991. Les mesures ont réellement commencé le 21 Juillet sur le réseau de Ranau et se sont terminées le 25 Juillet. La semaine précédant les mesures fut consacrée au dédouanement du matériel, au transport, à l'achat du petit matériel et à la reconnaissance du réseau de Ranau. Deux jours ont été nécessaires pour le transfert de Ranau à Singkarak. Les mesures du réseau de Singkarak ont débutées le 2 Août et s'achevèrent le 10 Août. En fin de mission, 10 jours furent nécessaires pour remballer le matériel et pour les démarches administratives en vue du retour en France.

Dans la mesure du possible nous avons effectué deux sessions de mesures GPS par jour (une de nuit et une de jours) puisque les éphémérides et les constellations des satellites s'avèrent favorables de jour entre 9h30 et 14h30 et de nuit entre 21h30 et 2h30. Durant ces deux périodes 4 à 7 satellites étaient alors observables dans la région (cf. Fig.4).

3-a : Equipements utilisés

Equipement expédié de France:

- 4 récepteurs GPS du parc de l'INSU (3 bifréquences ASHTECH et 1 monofréquence SERCEL) avec antennes et équipements associés;
- 2 DKM2A, 1 RANGE MASTER III, 1 AGA 14A;
- l'IPGP et l'IGN ont fourni le reste de l'instrumentation

- ensembles psychrométriques
- baromètres Wallace et Tiernan
- micro-ordinateurs portables TANDON , TOSHIBA T1600 et AMSTRAD
- contrôleurs de batteries Fluke
- chargeurs de batteries
- émetteurs-récepteurs
- Théodolites WILD T 2
- Géodimètre Aga 14 + batterie
- réflecteurs coin de cube et portes réflecteurs
- Adaptateurs
- miroirs de survie
- outillage divers
- paires de jumelles

Equipement fournis par le VSI:

- 1 T2 WILD;
- plusieurs trépieds coulissants

Matériel acheté sur place

- batteries 12v (40-50 A)
- outillage
- consommables (ciment, sable, boulons, tubes, piles, etc.)

3-b: Installation des points

Les points sont matérialisés par des boulons marqués d'une croix. Ces repères sont fixés dans le sol selon deux manières : (1) les repères sont directement scellés dans la roche avec du ciment dans le cas où la roche saine affleure, (2) les repères sont scellés dans une borne de béton d'environ 60 x 60 x 100 cm dans les secteurs où la roche saine n'affleure pas. Ce deuxième cas représente 80% des repères des réseaux dans une région où l'altération superficielle est particulièrement développée, surtout en terrain volcanique.

Trois repères auxiliaires ont été installés à faible distance de chaque point principal. Ces distances et la géométrie du réseau de rattachement varient selon la morphologie du lieu et les risques de destruction des repères (glissements de terrain, constructions, vandalisme).

Les contraintes imposées par la géodésie classique ont conduit à installer les points des réseaux de Sumatra autour des lacs. Pour les points GPS, les principaux soucis sont d'éviter

les masques, trouver des sites d'accès faciles et d'avoir une bonne espérance de longévité pour les repères. Ceci nous a amené à installer les points dans des zones dégagées le plus souvent en plaine ou en bord des lacs, ou sur des sommets facilement accessibles..

3-c : Observations météorologiques

Chaque opération nécessite des mesures de températures (sèche et humide) et de pression atmosphérique. Ces opérations étaient réalisées lors de chaque mesure, dans le cas des réseaux de géodésie classiques, aussi bien au point stationné qu'au point visé, et toutes les demi-heures pour les stations de géodésie spatiale GPS. Les thermomètres utilisés permettaient des mesures à 0,2°C de précision. Les baromètres Wallace et Tiernan ont été calibrés à 0,1 mm Hg

3-d : Les rattachements

Pour chaque station, il a été installé 1 point principal et 3 points auxiliaires, afin d'assurer au mieux la pérennité du réseau. Les rattachements consistent à relier pour chaque station les points entre eux par des mesures d'angles et de distances. Pour les points des réseaux GPS, distants de quelques dizaines de kilomètres, il n'existe pas de point commun visible. Des points auxiliaires ont été mesurés en GPS cinématique, afin de pouvoir orienter le réseau de rattachement. Cette méthode consiste à déplacer l'antenne de réception du point principal vers un point auxiliaire en conservant le suivi de la phase puis d'enregistrer les données pendant un laps de temps très court (5 mn).

3-e : Organisation sur le terrain

L'équipe géodésique était constituée de 13 personnes maximum (chauffeurs inclus). La composition des équipes a varié selon les besoins du moment (reconnaissance, monumentation, mesures, rattachement, intendance). Tous les membres ont participé à toutes les phases de l'opération. Les participants indonésiens ont dû s'initier très vite au maniement des récepteurs GPS et constituer rapidement des équipes autonomes d'une à deux personnes. Lors des sessions GPS, 4 équipes correspondant aux 4 récepteurs ont été constituées chaque jour, en fonction des disponibilités et des besoins.

FIGURE 4

Tables montrant que les éphémérides et les constellations des satellites s'avèrent favorables de jour entre 9h30 et 14h30 et de nuit entre 21h30 et 2h30.

Table 1 : Nombre de satellites (ordonnées) visible par heures (abscisse).

Table 2 : "Qualité" de la répartition géométrique des satellites

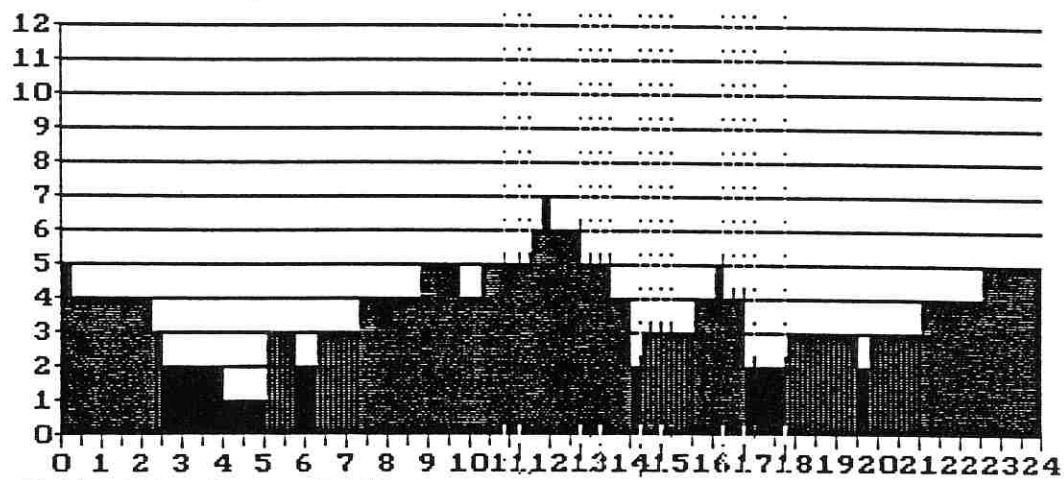


Table 1 Satellite availability

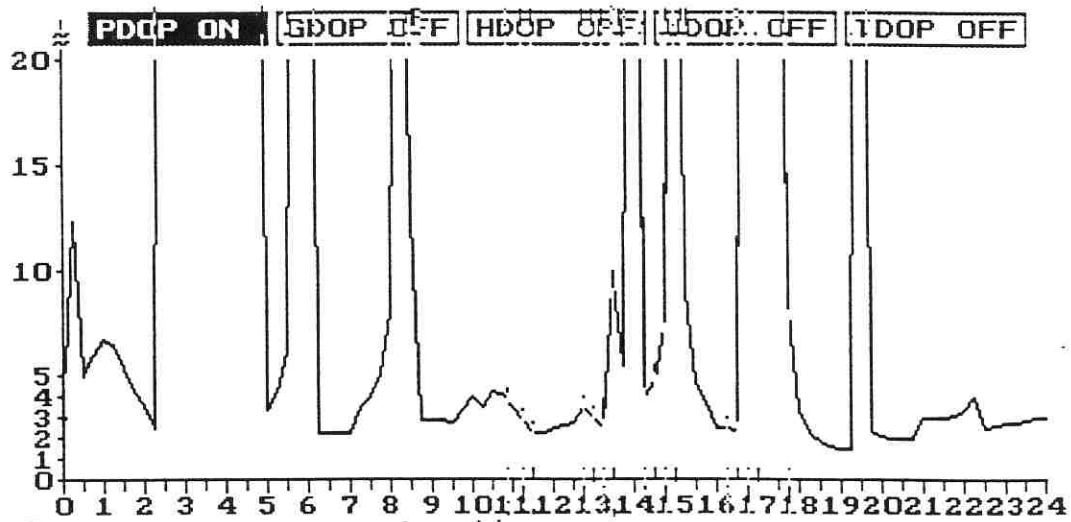


Table 2 Geometry dilution of precision

4 - LES RESEAUX GEODESIQUES

4-a : Sélection des Sites

Notre but était de trouver des zones d'implantation de deux réseaux de dimension modeste (maximum 3000 km²) centrés sur la faille de Sumatra, faciles d'accès et situés l'un au Sud, l'autre dans la partie centrale de la faille de Sumatra.

Nous avons choisi les régions des lacs de Ranau (A, Fig.3) et de Singkarak (B, Fig.3) pour les quatre raisons majeures énumérées ci-dessous :

1°) Dans ces deux régions nous disposions de documents Spot et Landsat. Une cartographie géologique détaillée avait été établie préalablement par photo-intérprétation des images Spot et Landsat (Fig.5 et 8) (Bellier, 1990; 1991; Bellier et al., 1991a et 1991b). Cette cartographie devait faciliter considérablement la reconnaissance de terrain et le choix d'implantation des réseaux. Dans ces deux régions la faille de Sumatra est très clairement observée sur les images satellitaires disponibles.

2°) Un des problèmes particulier qui se pose lors de toute étude de positionnement GPS est la présence d'obstacles (objets artificiels ou naturels élevés (arbres, poteaux, bâtiments, etc.)) proche du récepteur qui pourrait masquer les satellites bas ou créer des trajets d'ondes multiples. D'autre part, la géodésie terrestre nécessite une intervisibilité entre les points. Le long de la faille de Sumatra, la forêt tropicale est donc un problème crucial pour la géodésie.

Les deux régions choisis étaient les zones où la densité de végétation semblait la plus modérée pour des accessibilités aux points corrects. D'autre part la faille de Sumatra passe à travers les lacs de Ranau et de Singkarak. Donc la condition d'intervisibilité de points situés de part et d'autre de la faille est facilement réalisable en installant des points sur les rives des lacs.

3°) Dans ces deux régions la déformation est simple (et non diffuse) et représentée par un seul segment de faille actif et linéaire dont l'expression morphologique est très nette et marquée par un escarpement franc.

4°) L'analyse des images satellitaires a permis de déterminer des décalages horizontaux de marqueurs géomorphologiques récents de l'ordre de 500 à 1000 m montrant l'activité récente des segments de faille au niveau du lac de Ranau (encart haut-droite sur la Fig.6) et du lac de Singkarak.

4-b : Le réseau de Ranau

4-b.1 : Intérêt du réseau

Le réseau de *Ranau* est conçu pour mesurer les déplacements le long du segment méridional de la faille de Sumatra ainsi que la déformation instantanée autour de la faille majeure dans cette zone (Fig. 5 et 6).

4-b.2 : Disposition du réseau

Le réseau GPS de *Ranau* s'étend sur une zone longue de 45 km et large de 30 km au maximum (Fig.6 et 7). Il est composé de 9 stations (A à I) réparties autour du lac de *Ranau*. Aux stations A, B, C, E et F les mesures ont été effectuées uniquement par GPS. Les distances entre les stations G, H, I ont été effectuées par trilatération (géodésie terrestre), alors que le point D a été mesuré par géodésie classique et spatiale. Les distances entre stations varient de trois à quatre kilomètres environ pour les stations de géodésie terrestre et de 20 à 40 kilomètres pour les stations GPS. Quatre points ont été implantés sur le bloc Nord de la faille de Sumatra (D, E, F et G) et cinq sur le bloc Sud (A, B, C, H et I) (Fig. 6).

4-b.3: Mesures du réseau

Les mesures GPS, à *Ranau*, ont duré 5 jours (du 21 au 25 Juillet 1991) et se sont déroulées en deux sessions. La journée du 21 Juillet a été consacrée aux mesures de trilatération. Le choix des bases a été conditionné, bien entendu, par l'accessibilité des points et par la végétation.

4-c : Le réseau de Singkarak

4-c. 1 : Intérêt du réseau

Le réseau de *Singkarak* a les mêmes objectifs que celui de *Ranau* mais concerne la partie centrale de Sumatra: (1) mesurer les déplacements de la faille ; (2) étudier la géométrie des déformations et les quantifier dans une zone de 60 à 70 km autour de la faille (Fig. 8 et 9). Mais il a également pour fonction de se rattacher au réseau régional Américano-Indonésien installé par le DGGMR et le MIT en 1990 (point A et B).

4-c.2 : Disposition du réseau

Le réseau comprend 12 stations, dont 2 communes (A et B) avec le réseau de géodésie mis en place par les Américains. Il est long de soixante kilomètres et large de soixante kilomètres (Fig. 9 et 10). Huit points ont été implantés au Nord de la faille de

Sumatra (B, D, E, F, G, H, 1 et 2) et quatre au Sud (A, C, I et 5) (Fig. 8 et 9). Aux stations A, B, E, F, G, H et I, les mesures ont été effectuées uniquement par GPS. Les distances entre les stations 1, 2 et ont été mesurées par trilatération uniquement (géodésie terrestre), alors que les points D et C ont été mesurés par géodésie classique et spatiale. La distance entre chaque station varie de sept kilomètres environ pour les stations de géodésie terrestre et de vingt à soixante-dix kilomètres pour les stations GPS.

4-c.3 : Mesures du réseau

Les mesures GPS, à Singkarak ont duré 9 jours (du 2 au 10 Août 1991) uniquement durant une session de jour. Les mesures de trilatération ont été effectuées après les sessions GPS et durant la journée du 4 Août.

5 - LE DEPOUILLEMENT DES DONNEES ET LES TRAITEMENTS

5-a: Le déroulement des calculs

Les calculs des bases GPS se font avec le logiciel ASHTECH. L'ellipsoïde de référence utilisée est WGS 84. Les altitudes des points du réseau sont calculées par rapport à cet ellipsoïde. L'écart entre le géoïde et cet ellipsoïde est d'environ 90 m en Indonésie. L'intervalle d'enregistrement des données est de 10s. Cependant, l'atmosphère étant peu perturbée, il est possible de faire les calculs avec un intervalle d'enregistrement de 30 s qui diminue sensiblement les temps de calcul. Pour les calculs de trilatération, les altitudes (au dessus du géoïde) sont obtenues grâce aux zénithales réciproques et simultanées.

Les fichiers bruts de données sont transformés en fichiers utilisables grâce au programme MAKEUFIL qui calcule une position absolue approchée à une dizaine de mètres près. Un premier calcul des bases, effectué en utilisant la fréquence principale, permet d'apprécier la qualité des données. Le calcul est ensuite réitéré en utilisant les deux fréquences.

Les données aussi bien de géodésie classique que spatiale sont compensées grâce au logiciel de compensation AGE (J.C. Ruegg, IPG).

FIGURE 5

Détail de l'image Spot 278/360 montrant la faille active de Sumatra affectant les rives du lac de Ranau et traversant ce dernier

Détail du réseau de géodésie terrestre autour du lac de Ranau (points D, G, H, I).

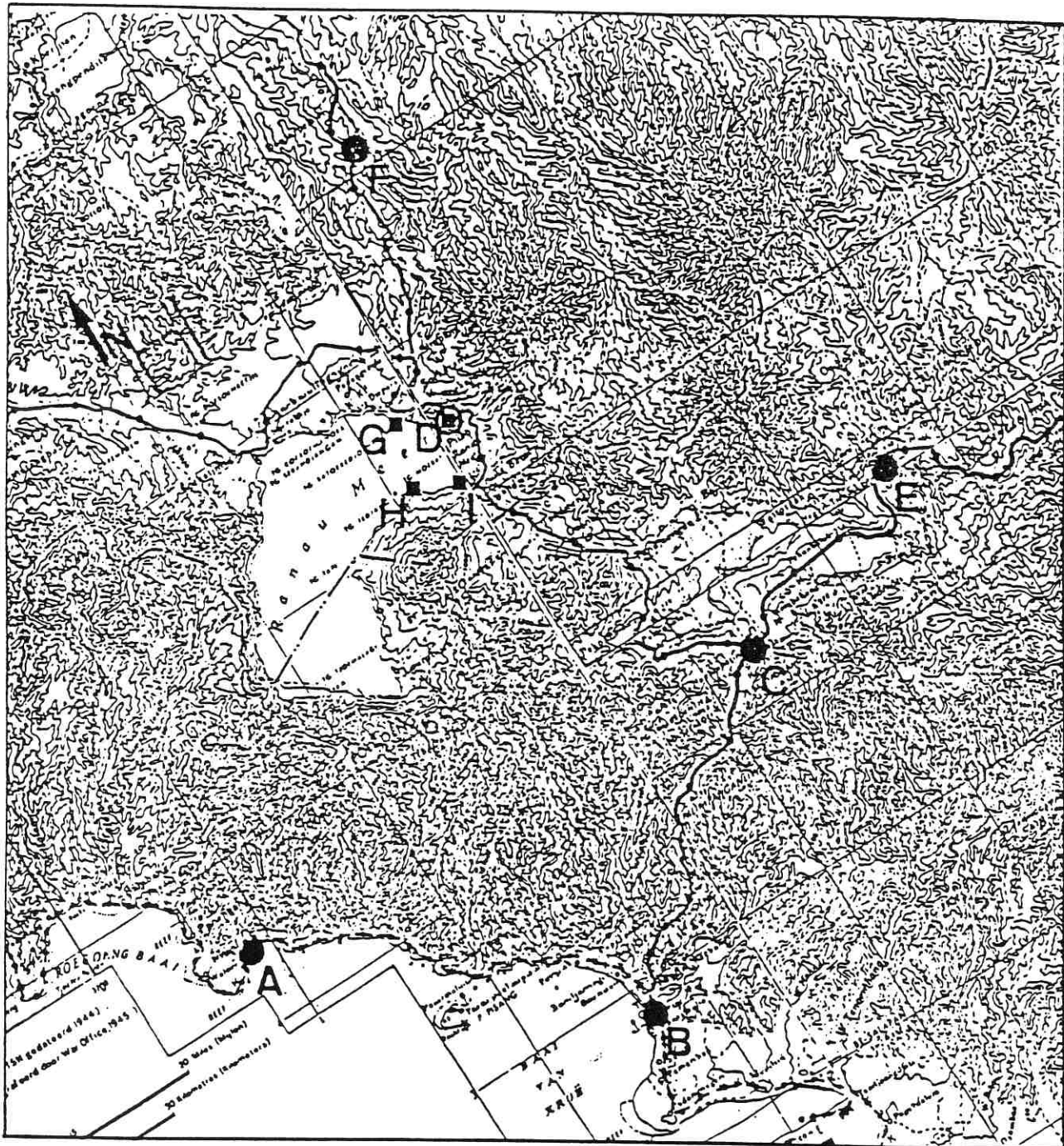
FIGURE 5

Détail de l'image Spot 278/360 montrant la faille active de Sumatra affectant les rives du lac de Ranau et traversant ce dernier

Détail du réseau de géodésie terrestre autour du lac de Ranau (points D, G, H, I).



FIGURE 6
Réseau géodésique du lac de Ranau.

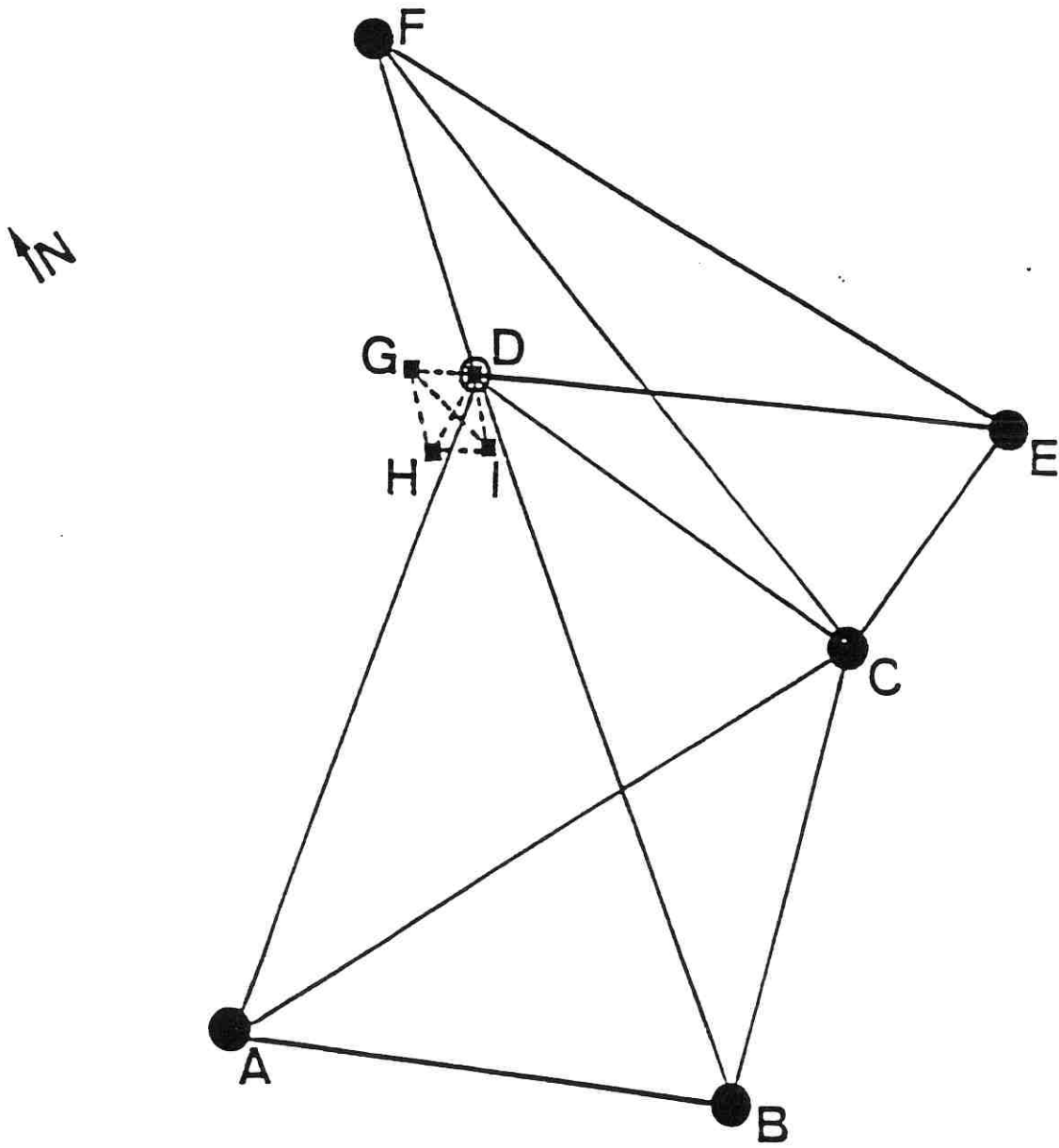


Réseau géodésique du lac de Ranau.

- Stations de géodésie spatiale GPS
- ◐ Stations de géodésie spatiale et terrestre
- Stations de géodésie terrestre

FIGURE 7

Détail du réseau géodésique du lac de Ranau montrant les distances mesurées



Détail du réseau géodésique du lac de Ranau.

0 10KM



Stations de géodésie spatiale GPS



Stations de géodésie spatiale et terrestre



Stations de géodésie terrestre



mesures de géodésie spatiale



mesures de géodésie terrestre

FIGURE 8

Détail de l'image Spot 269/351 montrant la faille active de Sumatra affectant et traversant le lac de Singkarak

Détail du réseau de géodésie terrestre autour du lac de Singkarak (points C, D, 1, 2 et 5).

FIGURE 8



FIGURE 9
Réseau géodésique du lac de Singkarak

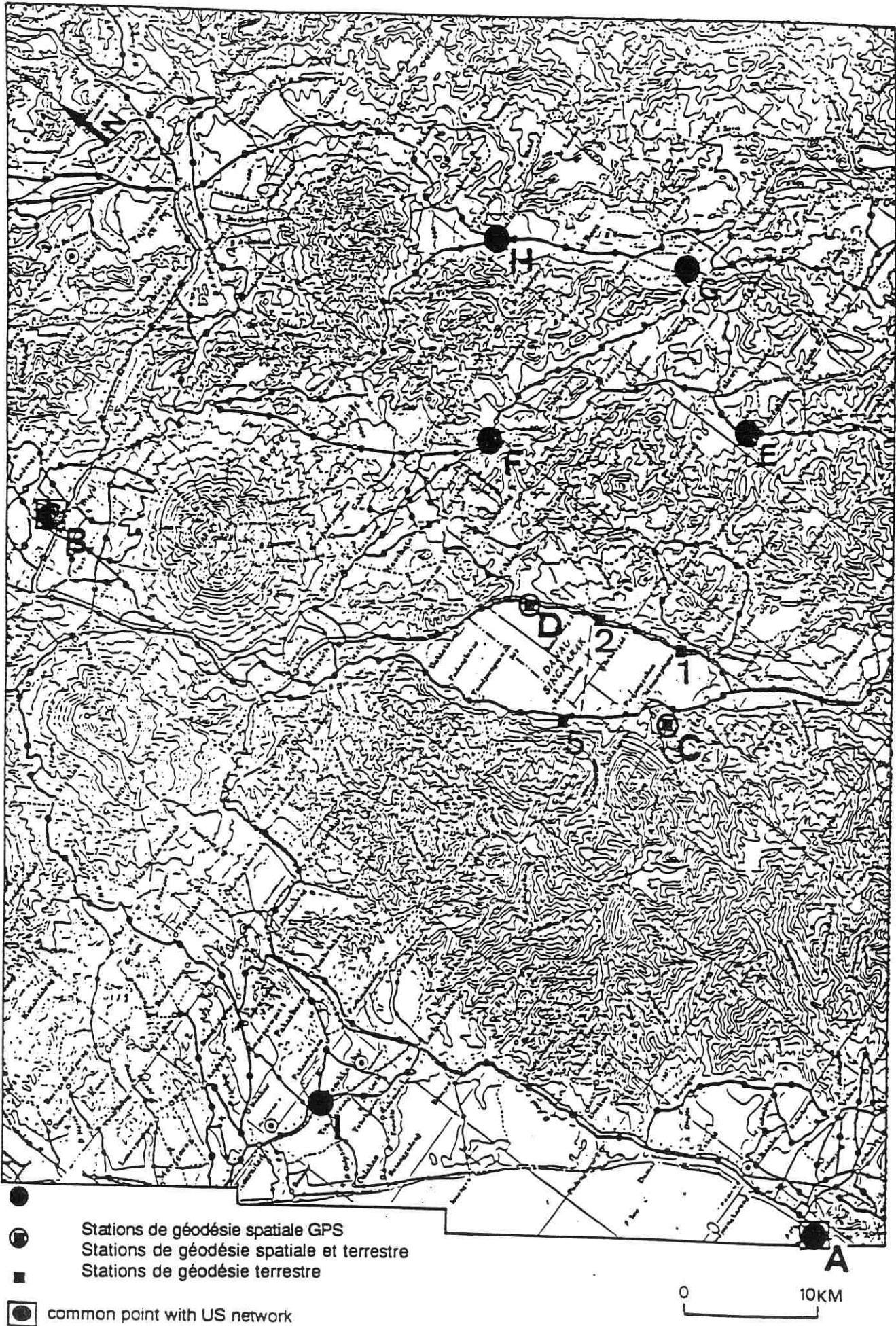
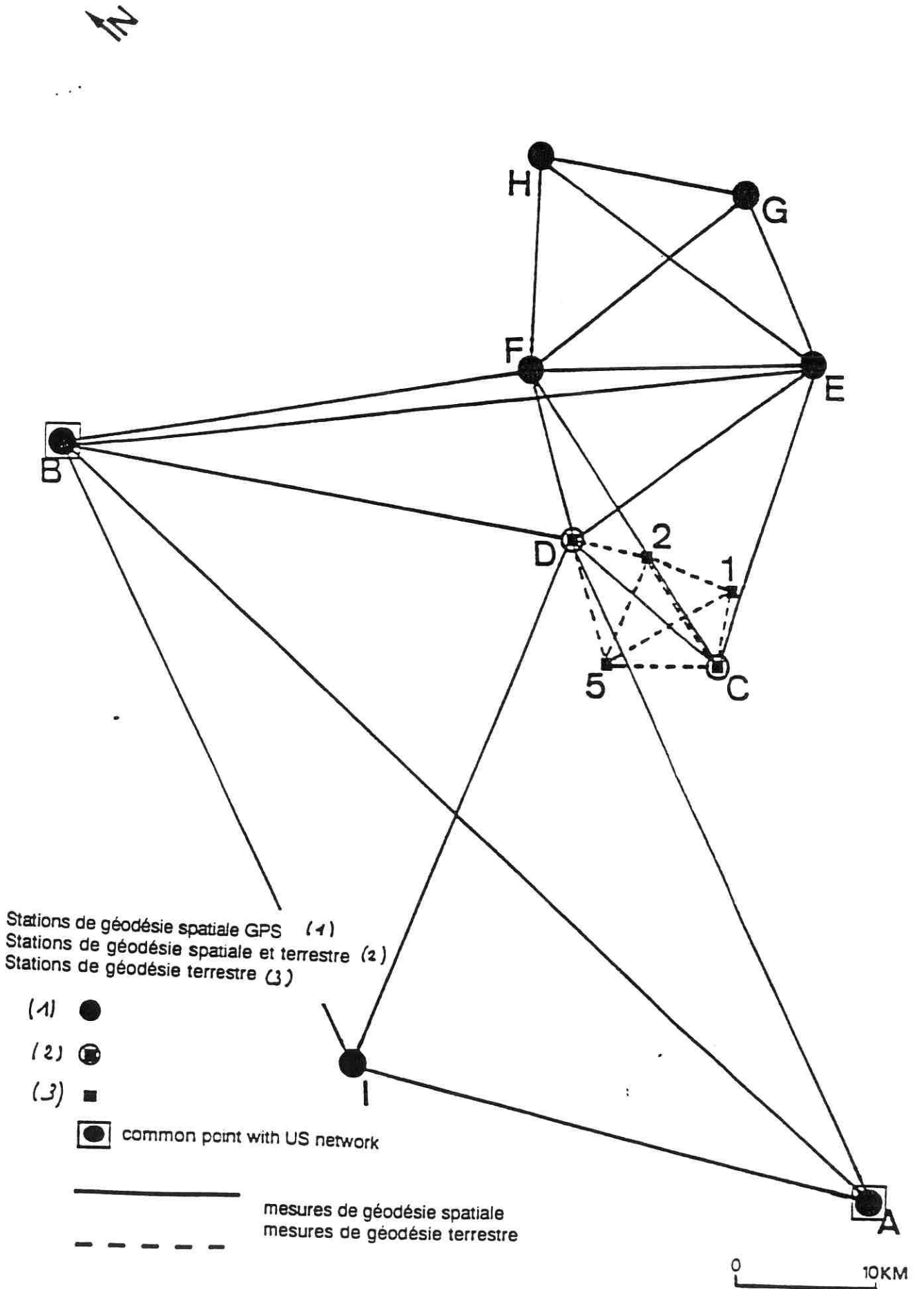


FIGURE 10

Détail du réseau du lac de Singkarak montrant les distances mesurées



5-b : Les résultats des calculs

L'ensemble des résultats des compensations des calculs GPS est présenté sous forme de tableaux ci-joints. Les principaux résultats concernant les vecteurs de chaque base mesurée au cours de chaque session sont situés en annexe II. Les calculs définitifs concernant la trilatération seront effectués lors de la réitération du réseau géodésique.

Les principales difficultés rencontrées au cours du traitement fut d'une part l'utilisation de bons modèles météorologiques et le filtrage de données issues de signaux brouillés émis par certains satellites. Nous noterons par exemple l'altération quasi-systématique des données issues de Satellite 13, que nous avons dû éliminer de la presque totalité des calculs.

Malgré les problèmes de météorologie, les résultats des itérations sont relativement correctes puisque les écarts-type sur les mesures (rms: cf. Annexe I) sont en général de l'ordre de 2 cm et sont encore améliorables.

6- CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

6-a : Perspective : la campagne de réitération des mesures

L'évaluation des déplacements relatifs le long de la faille de Sumatra, se fera lors de nouvelles mesures de distances entre les points des réseaux. Compte tenu ; (1) du taux de déplacement (maximum de 1 cm/an) estimé d'après l'étude cinématique régionale (Bellier et al., 1991a; 1991b) ; (2) de la précision des mesures de distance sur l'ensemble de chacun des réseaux lors de leur établissement ; (3) de la précision intrinsèque des équipements utilisés, nous pouvons raisonnablement attendre un déplacement mesurable significatif après un délai de 5 ans. Si avant cette date se produisait un séisme important dans les secteurs étudiés, il conviendrait de faire une mesure immédiate du réseau juste après l'événement sismique afin d'identifier et de quantifier la déformation co-sismique.

6-b : Période pour la campagne de réitération des mesures

Les réseaux de Ranau et Singkarak ont été établis en Juillet-Août 1991. Cette période s'est révélée la meilleure, notamment pour des raisons climatiques car cette période est relativement sèche. Il faudra pour la réitération du réseau éviter la saison des pluies qui débute en Septembre-Octobre car la pluviosité handicape considérablement les mesures de géodésie classique. D'autre part, les orages durant la saison humide peuvent s'avérer très destructeurs, interdisant tout travail de terrain ou le rendant très difficile. Toutefois nous essaierons de

sélectionner une période différente de celle de la campagne de 1991, car lors de cette dernière les mesures du réseau de Singkarak furent perturbées par la brume.

6-c : Prospectives et extension du réseau

Cette expérience de géodésie devrait contribuer à préciser les paramètres de la déformation de la Grande Faille de Sumatra en vue d'en évaluer les risques sismiques.

Une étude détaillée de la vitesse de déplacement sur la portion septentrionale de la grande faille de Sumatra, au nord de la jonction entre celle-ci et la faille de Mentawai, permettrait de préciser si les vitesses de déplacement sont de l'ordre de grandeur de celles estimées par les modèles. Cette déformation se répartissant au sud entre la faille de Mentawai et la grande faille de Sumatra, nous pourrions, connaissant les vitesses de la grande faille de Sumatra, en déduire la vitesse de la faille de Mentawai. Cette dernière étant difficilement mesurable du fait de l'immersion de la faille.

D'autre part, un vaste projet de géodésie spatiale est en cours de développement sous la coordination de X. Le Pichon (Consortium of European and Asean Scientists, 1992), en vue de l'étude des mouvements des plaques et de la déformation intracontinentale associée dans tout le Sud-Est de l'Asie. Ce projet est financé par la Communauté Economique Européenne et a pour but d'évaluer les zones à haut risque naturel dans la Sud Est de l'Asie (Fig.11). Notre programme d'étude sismotectonique de Sumatra, malgré son échelle plus modeste, pourra parfaitement s'intégrer dans le programme européen car il lui est complémentaire.

FIGURE 11

**Réseau géodésique du projet Européen de géodésie spatiale en cours de
préparation, en vue de l'étude des mouvements des plaques et de la
déformation intracontinentale associée dans tout le Sud-Est de l'Asie
(Consortium of European and Asean Scientists,1992)**



● GPS Stations 1 to 37

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Bellier O., (1990). - Etude tectonique du système de Faille de Sumatra (Indonésie): l'analyse de documents satellitaires (Spot, Landsat et Radar) contrainte par des données de terrain. Rapport CNES (1 Oct. 1989 -30 Mars 1990); Tome I, 28p.
- Bellier O., (1991). - Etude tectonique du système de Faille de Sumatra (Indonésie): l'analyse de documents satellitaires (Spot, Landsat et Radar) contrainte par des données de terrain - Comparaison avec les failles actives de l'Ouest des USA-. Rapport CNES (1 Mars 1990 -30 Mars 1991); Tome II, 26p.
- Bellier O., Sébrier M., et Pramumijoyo S. (1991a) - La Grande Faille de Sumatra: Géométrie, cinématique et quantité de déplacement mises en évidence par l'imagerie satellitaire. C. R. Acad. Sci. Paris, t. 312, série II, 1219-1226.
- Bellier O., Sébrier M., et Pramumijoyo S. (1991b) - Strike-slip faulting and volcanic calderas along the Great Sumatran fault. Terra abstracts, 3 (1), March 1991.
- Beck, Jr M.E. (1983) - On the mechanism of tectonic transport in zones of oblique subduction. Tectonophysics, 93: 1-11.
- Consortium of European and Asean Scientists, (1992) - Plate motion and crustal deformations deduced from space geodetic measurements for the assessment of related natural hazards in Southeast Asia. Proposal to the Commission of the European Communities.
- Curray, J.R. (1978) - Tectonic setting of the Central Sumatra Transact: Relationship to the Andaman sea (Résumé). Special issue: CCOP/SEATAR workshop on the Sumatra transact, Parapat, Indonesia.
- Curray, J.R., Emmel, F.J., Moore, D.G. & Raitt, R.W. (1982) - Structure, Tectonic and geological history of the northeastern Indian Ocean. Ocean Basins and Margins: The Indian Ocean, Plenum, New York, 399-450.
- Curray, J.R. (1989) - Andaman Sea, an oblique-convergence extensional basin (Résumé). 28th International Geological Congress, Abstracts, v.1 of 3, 1.352-1.353.
- Diament, M., Harjono, H., Karta, K., Deplus, C., Dahrin, D., Zen, M.T, Jr., Gérard, M., Lassal O., Martin, A., et Mallot J., (1992) - Mentawai fault zone off Sumatra : A new key to the geodynamics of Indonesia. Geology, v.20, 259-262.
- Duquesnoy Th., Ruegg J.C. et Hernandez A., (1992) - Implantation d'un réseau géodésique autour du point triple de Jalisco. Rapport IGN. Juin 1992.
- Equipe de sismotectonique Franco-Philippine (1991) - Etude sismotectonique de la partie centrale de la faille Philippine. "Rapport préliminaire - Risques naturels dans l'archipel philippin. Avril 1991, 115 p.
- Fitch, T.J. (1972) - Plate convergence, transcurrent faults, and internal deformation adjacent to Southeast Asia and western Pacific. J. Geophys. Res., 77, 4432-4460.
- Hamilton, W., (1979) - Tectonics of the Indonesian Region. United States Geological Survey Professional Paper 1078, 345 p.
- Harjono, H., Diament, M., Dubois, J. et Larue, M., (1988) - Sismicité du détroit de la Sonde (Indonésie) : présentation des résultats d'un réseau local. C. R. Acad. Sci. Paris, t. 307, série II, 565-571.
- Harjono H., Diament M., Dubois J., Larue M. et Zen M. T. (1991) - Seismicity of the Sunda Strait: an evidence for crustal extension and volcanological implications. Tectonics, 10 (1), 17-30.
- Huchon, P. and Le Pichon, X. (1984) - Sunda strait and Central Sumatra fault. Geology, 12, 668-672.
- Jarrard, R. D. (1986a) - Relations among subduction parameters. Reviews of Geophysics, 24 (2), 217-284.
- Jarrard, R. D. (1986b) - Terrane motion by strike-slip faulting of forearc slivers. Geology, 14, 780-783.
- Jolivet, L., Huchon, P., et Rangin C. (1989) - Tectonic setting of Western Pacific marginal basins. Tectonophysics, 160, 33-47.
- Kasser M., (1991) - Les appareils électroniques de mesures de distances ou stadimétries électroniques. Rapport IGN/ CNAM-ESGT, 71p.

- Lassal, O., Huchon, P. et Harjono, H. (1989) - Extension crustale dans le détroit de la Sonde (Indonésie). Données de la sismique réflexion (campagne du Krakatau). C. R. Acad. Sci., Paris, t.309, Série 11, 205-212.
- Lassal, O. (1991) - Evolution géodynamique de bassins sédimentaires par l'étude de la subsidence. Application au Détroit de la Sonde (Indonésie) et au bassin pétrolier "massique" (Algérie). Thèse doctorat de l'Université de Paris-Sud. Orsay, 371p.
- Minster, J. B. et Jordan, T. H. (1978) - Present-day plate motions. J. Geophys. Res., 83, 5331-5334.
- Pramumijoyo, S. (1991) - Néotectonique et sismotectonique de la terminaison méridionale de la grande faille de Sumatra et du détroit de la Sonde (indonésie). 27 Juin 1991, Thèse Université Paris Sud, 215 p.
- Rodolfo, K.S. (1969) - Bathymetry and marine geology of the Andaman basin, and tectonic implications for Southeast Asia. Geological Soc. Amer. Bull., v.80, 1203-1218.
- Savage J. C., Prescott W. H., (1973) - Precision of Geodolite distance measurements, J. Geophys. Res., 78, 6001-6008.

ANNEXES

**ANNEXE I : RESULTATS DES CALCULS ET DES
COMPENSATIONS**

**ANNEXE II : LISTE DES PARTICIPANTS AU PROJET DE
GEODESIE**

ANNEXE I

Le Réseau de Ranau :.

Les données calculées par le logiciel de traitement Ashtech GPPS

JOUR	BASE CODES DASE	DX sX	DY sY	DZ sZ
203	A-C 101-103	-34811.202 0.1218	-7702.0459 0.0790	164.0196 0.0354
203	A-B 101-102	-18277.6259 0.1491	-5994.0601 0.0981	-16127.5372 0.0334
203	A-C 101-103	-34811.2037 0.0410	-7702.0653 0.0370	164.0006 0.0092
204	A-B 101-102	-18277.6945 0.1139	-5994.0536 0.0686	-16127.5684 0.0236
204	A-D 101-104	-26749.8049 0.0463	-4102.5867 0.0363	21602.8580 0.0119
204	B-D 102-104-	8472.1113 0.1008	1891.4898 0.0600	37730.4312 0.0204
205	D-E 104-105	-20135.2931 0.0421	-6187.7646 0.0319	-16010.3052 0.0104
205	D-F 104-106	-5822.2910 0.0413	108.6049 0.0302	21285.8608 0.0105
205	E-F 105-106	14313.0020 0.0407	6296.3693 0.0327	37296.1660 0.0101
206	C-D 103-104	8061.3848 0.0371	3599.4691 0.0300	21438.8553 0.0105
206	C-E 103-105	-12073.8800 0.0374	-2588.3069 0.0307	5428.5483 0.0107
206	D-E 104-105	-20135.2669 0.0395	-6187.7697 0.0269	-16010.3048 0.0099
206	C-D 103-104	8061.4107 0.0313	3599.4096 0.0281	21438.8625 0.0072
206	C-F 103-106	2239.1461 0.0277	3707.9837 0.0291	42724.7241 0.0081
206	D-F 104-106	-5822.2650 0.0306	108.5723 0.0315	21285.8600 0.0088

Les données ont été compensées grâce au logiciel AGE (J. C. Ruegg)
Résultat de la compensation :

JOUR	BASE	DX	DY	DZ
	CODES DASE	résidus	résidus	résidus
203	A-C	-34811.206	-7702.0388	164.0011
	101-103	0.0044	-0.0071	0.0185
203	A-B	-18277.6891	-5994.0684	-16127.5682
	101-102	0.0632	0.0083	0.0097
203	A-C	-34811.2064	-7702.0388	164.0011
	101-103	0.0027	-0.0265	-0.0005
204	A-B	-18277.6891	-5994.0684	-16127.5682
	101-102	-0.0054	0.0148	-0.0002
204	A-D	-26749.8017	-4102.6008	21602.8608
	101-104	-0.0032	0.0141	-0.0028
204	B-D	-8472.1126	1891.4676	37730.4290
	102-104	0.0013	0.0222	0.0022
205	D-E	-20135.2790	-6187.7665	-16010.3063
	104-105	-0.0141	0.0019	0.0011
205	D-F	-5822.2691	108.5805	21285.8615
	104-106	-0.0219	0.0244	-0.0007
205	E-F	14313.0099	6296.3470	37296.1678
	105-106	-0.0079	0.0223	-0.0018
206	C-D	8061.4047	3599.4380	21438.8598
	103-104	-0.0199	0.0311	-0.0045
206	C-E	-12073.8743	-2588.3285	5428.5534
	103-105	-0.0057	0.0216	-0.0051
206	D-E	-20135.2790	-6187.7665	-16010.3063
	104-105	0.0121	-0.0032	0.0015
206	C-D	8061.4047	3599.4380	21438.8598
	103-104	0.0060	-0.0284	0.0027
206	C-F	2239.1356	3708.0185	42724.7213
	103-106	0.0105	-0.0348	0.0028
206	D-F	-5822.2691	108.5805	21285.8615
	104-106	0.0041	-0.0082	-0.0015

RMS = 0.0168 m
S = 0.0203 m

COORDONNEES GEOGRAPHIQUES FINALES sur ellipsoïde WGS84

Point	Longitude	Latitude	Altitude
A-101	103°45'42.858 E	5° 2'31.8233 S	24.354
B-102	103°56' 5.625 E	5°11'18.953 S	23.068
C-103	104° 4' 59.851 E	5° 2' 23.930 S	906.655
D-104	104° 0'17.685 E	4°50'44.361 S	589.338
E-105	104°11'40.398 E	4°59'26.656 S	869.807
F-106	104° 3'20.115 E	4°39' 9.740 S	338.647

Le Réseau de Padang .:

Les données calculées par le logiciel de traitement Ashtech GPPS

JOUR	BASE CODES DASE	DX sX	DY sY	DZ sZ
214	F-D	11182.9915	2046.2857	-9099.0155
	206-204	0.0400	0.0336	0.0098
214	F-E	-9811.6410	-1955.5619	-17985.555
	206-205	0.0389	0.0328	0.0096
214	D-E	-20994.633	-4001.8464	-886.5392
	204-205	0.0570	0.0475	0.0140
215	F-D	11182.9970	2046.2807	-9098.9973
	206-204	0.0600	0.0536	0.0193
215	F-E	-9811.6465	-1955.5672	-17985.545
	206-205	0.0349	0.0317	0.0114
215	D-E	-20994.648	-4001.8464	-8886.5467
	204-205	0.0651	0.0533	0.0175
217	F-G	-15762.574	-3189.8614	-6286.8434
	206-207	0.0359	0.0289	0.0096
217	F-H	-10617.794	-1997.8790	3820.0580
	206-208	0.0571	0.0455	0.0148
218	F-E	-9811.5952	-1955.6113	-17985.542
	206-205	0.0448	0.0389	0.0151
218	F-G	-15762.547	-3189.8566	-6286.8422
	206-207	0.0395	0.0344	0.0134
218	G-E	5950.9476	1234.2510	-11698.698
	207-205	0.0376	0.0336	0.0113

219	G-E	5950.9342	1234.2798	-11698.708
	207-205	0.0331	0.0288	0.0094
219	E-H	-806.1723	-42.2460	21805.6034
	205-208	0.0345	0.0267	0.0091
219	H-G	-5144.7652	-1192.0294	-10106.897
	208-207	0.0392	0.0339	0.0108
220	B-F	-25991.298	-5564.6319	-21722.790
	202-206	0.0341	0.0307	0.0103
220	B-E	-35802.910	-7520.3027	-39708.341
	202-205	0.0377	0.0338	0.0113
220	F-E	-9811.6157	-1955.6738	-17985.552
	206-205	0.0285	0.0226	0.0075
221	I-A	-17080.230	-3582.8569	-33183.353
	209-201	0.0460	0.0409	0.0148
221	I-B	-22685.493	-2907.1504	38973.0606
	209-202	0.0634	0.0560	0.0201
221	A-B	-5605.2706	675.7053	72156.424
	201-202	0.0466	0.0376	0.0121
222	A-D	-20413.621	-2842.6762	41334.6215
	201-204	0.0749	0.0603	0.0195
222	I-A	-17080.200	-3582.8715	-33183.363
	209-201	0.0622	0.0502	0.0166
222	I-D	-37493.809	-6425.5472	8151.2613
	209-204	0.0514	0.0416	0.0139
223	I-A	-17080.249	-3582.8279	-33183.363
	209-201	0.0519	0.0419	0.0139
223	I-B	-22685.517	-2907.1476	38973.0567
	209-202	0.0619	0.0484	0.0163

Les données ont été compensées grâce au logiciel AGE (J. C. Ruegg)
Résultat de la compensation :

JOUR	BASE	DX	DY	DZ
	CODESDASE	sX	sY	sZ
214	F-D	11182.9961	2046.2631	-9099.0101
	206-204	-0.0046	0.0226	-0.0054
214	F-E	-9811.6251	-1955.6141	-17985.550
	206-205	-0.0159	0.0522	-0.0049

214	D-E	-20994.621	-4001.8772	-8886.5400
	204-205	-0.0122	0.0308	0.0008
215	F-D	11182.9961	2046.2631	-9099.0101
	206-204	0.0009	0.0176	0.0128
215	F-E	-9811.6251	-1955.6141	-17985.550
	206-205	-0.0214	0.0469	0.0046
215	D-E	-20994.621	-4001.8772	-8886.5400
	204-205	-0.0268	0.0308	-0.0067
217	F-G	-15762.563	-3189.8732	-6286.8444
	206-207	-0.0106	0.0118	0.0010
217	F-H	-10617.797	-1997.8576	3820.0540
	206-208	0.0027	-0.0214	0.0040
218	F-E	-9811.6251	-1955.6141	-17985.550
	206-205	0.0299	0.0028	0.0083
218	F-G	-15762.563	-3189.8732	-6286.8444
	206-207	0.0160	0.0166	0.0022
218	G-E	5950.9381	1234.2590	-11698.706
	207-205	0.0095	-0.0080	0.0076
219	G-E	5950.9381	1234.2590	-11698.706
	207-205	-0.0039	0.0208	-0.0024
219	E-H	-806.1717	-42.2435	21805.6041
	205-208	-0.0006	-0.0025	-0.0007
219	H-G	-5144.7664	-1192.0156	-10106.898
	208-207	0.0012	-0.0138	0.0012
220	B-F	-25991.296	-5564.6555	-21722.790
	202-206	-0.0021	0.0236	0.0001
220	B-E	-35802.9215	-7520.2696	-39708.341
	202-205	0.0111	-0.0331	-0.0007
220	F-E	-9811.6251	-1955.6141	-17985.550
	206-205	0.0094	-0.0597	-0.0021
221	I-A	-17080.230	-3582.8527	-33183.3607
	209-201	0.0002	-0.0042	0.0080
221	I-B	-22685.5080	-2907.1468	38973.0611
	209-202	0.0152	-0.0036	-0.0005
221	A-B	-5605.2781	675.7058	72156.422
	201-202	0.0075	-0.0005	0.0019
222	A-D	-20413.5784	-2842.6865	41334.6214
	201-204	-0.0425	0.0103	0.0001

222	I-A	-17080.2299	-3582.8527	-33183.3607
	209-201	0.0299	-0.0188	-0.0026
222	I-D	-37493.8083	-6425.5392	8151.2606
	209-204	-0.0010	-0.0080	0.0007
223	I-A	-17080.2299	-3582.8527	-33183.3607
	209-201	-0.0196	0.0248	-0.0026
223	I-B	-22685.5080	-2907.1468	38973.0611
	209-202	-0.0092	-0.0008	-0.0044

RMS = 0.0176 m

S = 0.0206 m

COORDONNEES GEOGRAPHIQUES FINALES sur ellipsoide WGS84

Point	Longitude	Latitude	Altitude
A-201	100°22' 9.277 E	0°56'38.019 S	9.180
B-202	100°25' 3.632 E	0°17'28.510 S	907.210
D-204	100°33'15.199 E	0°34' 12.042 S	374.276
E-205	100°44'46.370 E	0°39' 1.347 S	416.053
F-206	100°39'22.846 E	0°29'15.818 S	337.118
G-207	100°48' 2.890 E	0°32'40.542 S	193.953
H-208	100°45'12.238 E	0°27'11.456 S	314.921
I-209	100°12'45.045 E	0°38'37.552 S	23.306

ANNEXE II

LISTE DES PARTICIPANTS AU PROJET

RESPONSABLE DU PROJET SISMOTECTONIQUE

Michel Sébrier: LGDI-URA Géophysique et Géodynamique Interne -
ORSAY/ Univ. Paris Sud

RESPONSABLE DU VOLET GEODESIQUE DU PROJET

Michel Kasser : ESGT/CNAM et IGN- LOEMI

PREPARATION DE LA MISSION ET REDACTION DU RAPPORT

Thierry Duquesnoy : LOEMI/Service Recherche - IGN
Olivier Bellier : LOEMI/Service Recherche - IGN

LISTE DES PARTICIPANTS A LA MISSION DE TERRAIN

Nazhar Buyung (DGGMR)
Thierry Duquesnoy (IGN) - Chef de mission
Ismet Effendi (DGGMR)
Pierre Laulier (IGN)
Subagyo Pramumijoyo (UGM :Universitas Gadjah Mada)
Eka T. Putranto (DGGMR)
Jacques Rigaux (IGN)
Michel Sebrier (LGDI -Université de Paris Sud)
Subandrio (DGGMR)

et les chauffeurs :

Amir Jamuir
Dedi
Harman
Rahmar

TROISIÈME PARTIE

EVALUATION DU RISQUE SISMIQUE LIE A LA GRANDE FAILLE DE SUMATRA

Analyse basée sur la
sismicité historique
et
les données des réseaux
permanents

Novembre 1993

1. INTRODUCTION

Dans la suite des travaux menés en néotectonique et imagerie satellitaire sur la grande faille de Sumatra, nous avons regroupé et interprété l'ensemble des informations sismologiques disponibles sur ce système de faille intra-continentale.

Les travaux antérieurs (voir *Duquesnoy et al.*, 1992, et *Sébrier et al.*, 1993) ont montré la très grande linéarité de ce système de failles, la présence de bassins en pull-apart associés à de grands édifices volcaniques (par exemple Toba), et ont permis de faire une estimation des variations de vitesse de déplacement le long de la faille.

A partir des données existantes (1: sismicité historique; 2: données du réseau mondial NEIC; 3: données des stations régionales permanentes indonésiennes; et 4: données du réseau dense récent de Medan), nous effectuons une synthèse permettant d'améliorer la connaissance du risque sismique lié à ce système de failles.

2. SISMICITE HISTORIQUE

A. Interprétation et limites des données historiques

Des informations précises sur les grands séismes ayant affecté l'île de Sumatra existent depuis les années 1820. Nous avons réuni et interprété plusieurs documents fournis par nos collègues du BMG à Jakarta. Comme au voisinage de toutes les grandes zones de subduction (par exemple dans les Andes), une difficulté majeure est de séparer les secousses sismiques provenant de l'activité de cette zone de subduction et de celles provenant de la Grande Faille de Sumatra. Nous avons donc apporté un grand soin dans la sélection des critères de séparation des deux sources potentielles d'ébranlement sismique. Parmi ceux-ci, les plus importants ont été:

- 1) les effets "locaux" observés au sol: fissures ouvertes, 'cracks', glissements de terrain;
- 2) les dégâts sur constructions humaines, en tenant compte de : la densité variable de population; la qualité des constructions; l'extension géographique des zones affectées directement par la secousse principale et les répliques majeures;

- 3) l'observation de tsunamis (océan ou lacs), leur amplitude, leur extension, et le rôle éventuel joué par le glissement de masses sédimentaires sous-marines;

- 4) l'étude des isoséistes dans les cas favorables, permettant d'estimer: la profondeur du foyer (espacement des courbes); la direction et le sens de la rupture; l'extension horizontale de la rupture et la magnitude du séisme.

B. Chronologie des grandes ruptures (intensité \geq VIII) (voir Fig. 1)

- **1833**: 24/11, séisme atteignant l'intensité VIII - IX (MMI) à **Bengkulu**; tsunami. Nombreux édifices effondrés. Peu d'informations précises. *Probable séisme de subduction.*

- **1835**: 26/08, séisme atteignant l'intensité VII - VIII (MMI) à **Padang**; pas de tsunami. Légers dégâts sur constructions; fissures nombreuses. *Séisme crustal?*

- **1843**: 05/01, séisme atteignant l'intensité VII - VIII (MMI) à **Nias (Gunung Sitoli et Baras)**; tsunami. Glissements de terrain. *Probable séisme de subduction.*

- **1852**: 09/01, séisme atteignant l'intensité VII - VIII (MMI) à **Teluk Betung (Sud Sumatra)**; tsunami. Nombreux édifices effondrés. Peu d'informations précises. *Probable séisme de subduction.*

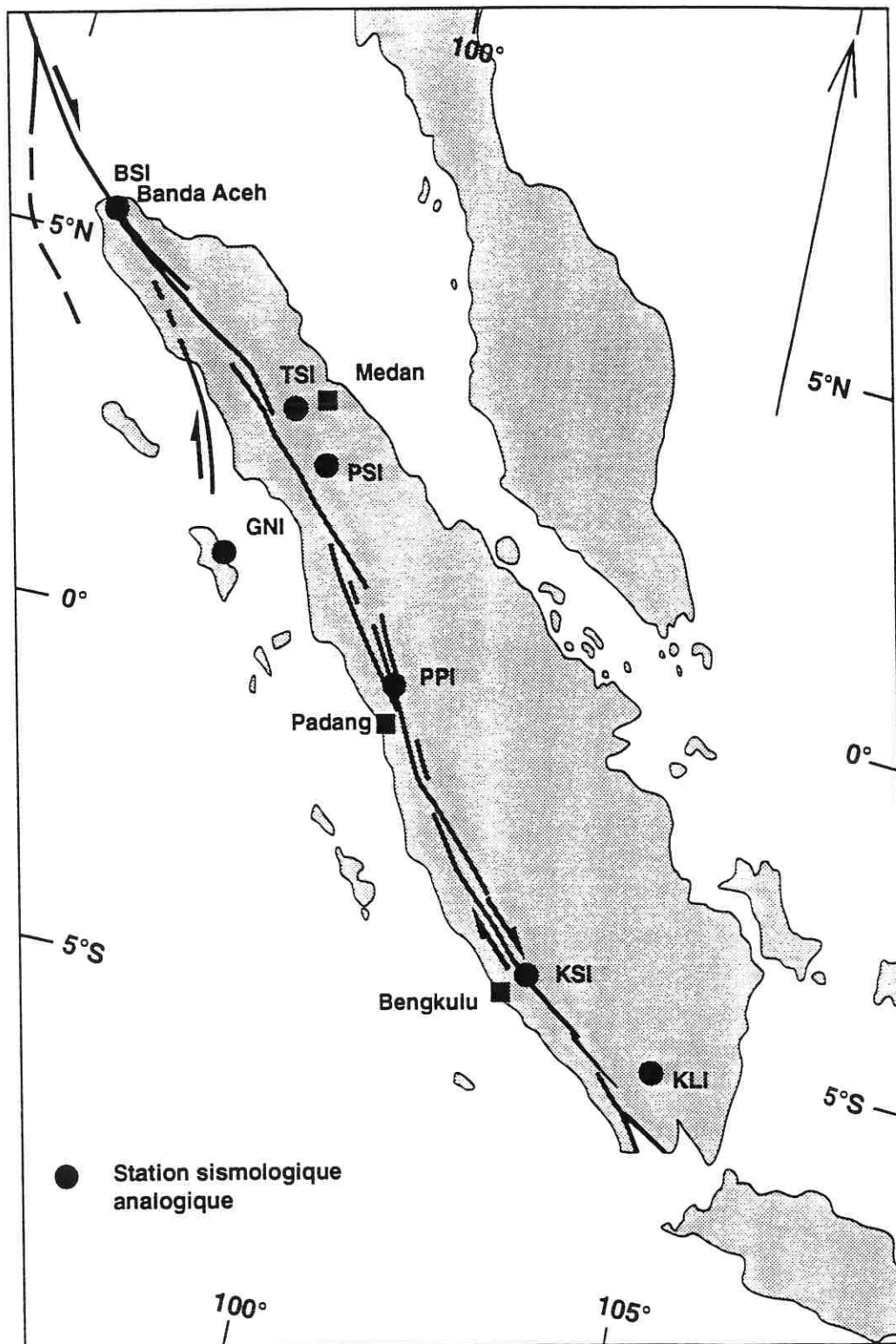
- **1861**: 16/02, séisme atteignant l'intensité VIII - IX (MMI) à **Tapanuli et Sibolga**; tsunami (Singil, Nias, Tello). *Probable séisme de subduction.*

- **1914**: 26/07, séisme atteignant l'intensité IX (MMI) à **Kepahiang - Bengkulu**; pas de tsunami. Forts dégâts sur constructions en pierre; ponts et routes détruits. *Séisme crustal?*

- **1921**: 01/04, séisme atteignant l'intensité IX (MMI) à **Tapanuli (Sud de Toba)**; pas de tsunami. Zone épiscopale dans une ceinture étroite NW-SE sur 80 km au sud de Toba. Forts dégâts sur constructions en pierre; ponts et routes détruits. *Séisme crustal.*

- **1926**: 28/06, séisme atteignant l'intensité IX (MMI) à **Singkarak (NW de Padang)**; $M = 6 \frac{3}{4}$; lat: $0,7^{\circ}$ S, $100,6^{\circ}$ E. Nombreuses répliques ressenties entre Padangpanjang et Solok. Subsidence d'une partie du lac Singkarak (vague de plus de 2 m). Pas de tsunami. Zone de dégâts importants dans une ceinture étroite (43 km) entre Baru et Singkarak. *Séisme crustal.*

Figure 1 : Carte de localisation des principales ville citées dans le texte et des stations sismologiques analogiques du réseau BMG de l'île de Sumatra



- **1933**: 25/06, séisme atteignant l'intensité VIII-IX (MMI) à **5,0°S et 104,2°E (Sud Sumatra)**; pas de tsunami. Nombreuses répliques ressenties. Fissures et subsidences très locales depuis Kota Agung jusqu'à Makaka. *Séisme crustal*.

- **1936**: 19/09, séisme atteignant l'intensité VIII (MMI) à **Tapanuli (0,5°N; 99,5°E)**; pas de tsunami. Dommages mineurs à Medan, importants dans la région de KARO. Nombreux cracks en surface repérés près de la faille. Glissements de terrain. *Séisme crustal*.

- **1943**: 09/06, séisme de magnitude 7,6; non répertorié dans les archives indonésiennes consultées, en raison de la guerre. Décrit par *Untung et al.* (1985) comme étant localisé entre les lacs Singkarak et Diatas (50 km). Traces en surface. *Séisme crustal*.

- **1977** (08/03), **1979** (15/12), et **1984** (27/08) : séismes majeurs enregistrés pendant la période instrumentale, décrits au paragraphe 3 - C ci-dessous.

Enfin, signalons que le séisme de Tapanuli du 17/05/1892, qui a produit un déplacement dextre de points géodésiques situées de part et d'autre de la Grande Faille de Sumatra, n'est répertorié qu'avec une intensité de VI (MMI).

C. Bilan par zones et premières conclusions

L'observation détaillée de la sismicité historique fait ressortir les points suivants:

- L'activité sismique liée à la faille de Sumatra est incontestable, au moins dans les zones autour de Padangpanjang - Singkarak (0,7°S; 100,6°E), Tapanuli (1,5°N; 97,5°E), Nord de Bengkulu (3,7°S; 102,5°E), et de façon moins importante à Banda Aceh.

- Les plus grandes ruptures historiques atteignent des magnitudes de 7,6 dans la région de Singkarak (les ruptures des séismes de 1926 et de 1943 sont probablement en partielle surimposition), impliquant des ruptures de l'ordre de 150 km au moins.

- En dépit des limites d'interprétation liées à une densité de population assez hétérogène entre Bengkulu et Padang notamment, il apparaît que la faille de Sumatra fonctionne par segment, les derniers activés étant ceux de part et d'autre du lac de Singkarak, au Nord de Kepahiang (Bengkulu), et à Tapanuli (Sud Toba). Les segments entre ces zones sont soit "asismiques" (creeping), soit bloqués (cycle intersismique?).

3. SISMICITE INSTRUMENTALE

A. *Le réseau mondial*

1. Un problème majeur: la mauvaise qualité des localisations

Par l'étude en 1991 de la sismicité en mer au sud de Bengkulu (réseaux OBS et terrestre), un décalage épical a déjà été observé. Nous démontrons ce biais par d'autres exemples pris pour des séismes contraints par les stations régionales (voir paragraphe 3 - C). L'ordre de grandeur pourrait atteindre 50 km.

2. Les grands apports du réseau mondial

En dépit de cette difficulté, il est possible d'observer deux points importants:

1. Depuis 25 ans environ, une activité crustale superficielle non négligeable peut être discernée essentiellement au Nord et au centre de Sumatra, surtout entre les régions de Sud Toba et de Padangpanjang, donc en assez bonne coïncidence avec des zones historiquement très actives;

2. En appliquant un facteur correctif à l'aide des stations régionales proches, il se confirme l'existence d'une zone de sismicité anormale entre Bengkulu et Enggano, en mer: ceci pourrait être un relais actif majeur entre le système de faille de Sumatra et celui de Mentawai.

Ces deux points devraient être précisés par des travaux futurs.

B. *Le réseau régional: l'étude des écarts S - P*

1. Présentation des stations du réseau permanent

La carte de la Figure 1 présente la localisation des 7 stations du réseau analogique permanent de Sumatra, installé entre 1976 et 1983, et les stations du réseau télémétré de Medan, installé en 1990 et fonctionnel depuis 1991. Les positions des stations et leurs grandes caractéristiques sont résumées sur la Table 1.

Les séismes enregistrés à Sumatra ont trois origines: les séismes liés à la subduction (contact chevauchant entre les plaques Indo-Australienne et Eurasiatique-Sonde), les séismes

Réseau sismologique Sumatra.

Réseau télémètre Medan

	Latitude	Longitude	Alt m	Lieu
LARI	02°53'08.2"N	98°09'25.9"E	820	LAURAMBONG SUMATRA
SEMI	02°27'37.1"N	98°23'30.1"E	1750	SEMPONON SUMATRA
SIBI	03°14'27.0"N	98°30'16.0"E	2050	SIBAYAK
SIMI	02°41'20.0"N	98°56'49.0"E	1681	SIMARBALATUK
PCBI	01°36'24.0"N	98°55'31.0"E	1000	PANCUR BATU
HUTI	02°18'55.1"N	98°58'16.0"E	1600	HUTA GINJANG
AEKI	02°06'06.1"N	98°27'13.0"E	250	AEK NABARA
MRPI	01°36'45.0"N	99°19'02.0"E	1100	MARIPONIPON

Station télémétrée Sud-Sumatra

	Latitude	Longitude	Alt m	Lieu
PENI	05°34'00.0"N	105°10'16.0"E	200m	PENDAGAN

Réseau analogique (UNESCO 1977)

	Latitude	Longitude	Alt m	Ampli	Lieu
BSI	05°29'42.0"N	95°17'36.0"E	38	56K	Banda Aceh
TSI	03°30'03.0"N	98°33'52.2"E	86	28K	Tuntungan
PSI	02°41'42.0"N	98°55'26.4"E	987	450K	Parapat Digitised LP Bd 3 comp
GNI	01°34'13.0"N	97°34'34.0"E	175	112K	Gunung Sitoli appelé aussi GSTI
PPI	00°27'24.5"S	100°23'49.2"E	784	225K	Padangpanjang
KSI	03°38'01.8"S	102°35'32.4"E	517	14K-9K	Kepahiang -Bengkulu
KLI	04°51'47.4"S	104°51'24.0"E	39	112.5K	Kota Bumi

Variation des gains (sauf indications contraires, la valeur est pour 3Hz).

BSI 1980 56K, 1982 56K, 1993 56K

PPI 1980-86 230K (2.6Hz), 85K (1Hz), 1987-90 59K (2.8 Hz) 17K (1Hz), 1991 63K (3Hz) 21K(1Hz).

GNI 1990 112K (2.5Hz)

KBI 1979 14K, 1983 15K(2.8 Hz), 1987 9K (2 Hz), 1990 9K (2 Hz)

TSI 1977 28K.

KLI 1984 112K.

PSI 1980 450K.

- TABLEAU 1 -

liés à la déformation de la plaque plongeante et les séismes crustaux de Sumatra liés pour la plupart à la faille de Sumatra. Seule la dernière population de séismes étaient l'objet de notre étude.

2. Principes de l'analyse

Nous avons procédé, en fonction de la faible densité du réseau, à une analyse statistique sur les différences de temps d'arrivée aux stations analogiques de Sumatra (réseau analogique), sur des périodes de temps les plus longues possibles (15 ans). Pour les stations analogiques de Sumatra, nous avons cherché à identifier les séismes par populations suivant les différences de temps d'arrivée des ondes S et P:

- **S-P<3,5 secondes**, ces séismes sont très proches de la station (moins de 25 km) et traduisent une déformation de la croûte sous le site ou à proximité immédiate.

- **3,5<S-P<6 secondes**, ces séismes sont localisés dans la croûte de Sumatra et traduisent donc une déformation interne à l'île. Ces séismes peuvent être considérés comme générés par la faille de Sumatra, dans le cas où une portion de la faille est comprise entre les cercles distants de 25 km et 50 km à la station.

- **6<S-P<9 secondes**, ces séismes sont trop éloignés pour pouvoir être rattachés à une déformation crustale de Sumatra, sauf dans le cas où la station étudiée est assez loin de la faille (de 50 km à 75 km environ). La difficulté pour cette catégorie est que les séismes peuvent parfois provenir du panneau plongeant de la subduction, ou d'une autre zone crustale active.

- **S-P>9 secondes**, cette quatrième population est composée de séismes dont la distance à la station étudiée est comprise entre 1° et 1,4°. Cette population se rattache pour la station de Parapat au segment sud de la faille qui va vers Padang: elle est donc dans ce cas riche d'informations.. Pour d'autres, comme Kotabumi, elle peut aussi être liée à l'activité du détroit de la Sonde, ce qui limite fortement le lien possible à faire avec la faille de Sumatra.

Nous avons donc bien entendu nuancé notre interprétation de ces catégories de séismes en fonction de la position de la station étudiée par rapport à la faille de Sumatra.

3. Résultats préliminaires par station

- *Banda Aceh (BSI):*

L'activité à Banda Aceh a été déterminée sur 5 années. il résulte qu'il y a une activité significative pour les séismes dont le S-P est inférieur à 3,5 secondes. Cela correspond à la faille de Sumatra dont une branche est très proche de la station.

- *Parapat (PSI):*

Cette station est sur la rive nord du lac Toba. Dans cette région, la faille de Sumatra se divise ou s'est divisée en plusieurs branches. L'activité pour la population 1 est plus sporadique qu'à Banda Aceh. Cette station a la particularité d'être à 100-150 km d'un segment de la faille de Sumatra considéré comme actif (zone de Tapanuli). Le tableau ci-dessous montre l'activité sismique pour des S-P correspondant à cette distance:

Mois	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
Année												
1979	04	03	01	03	06	03	09	03	04	07	09	07
1980	08	04	10	07	09	04	07	02	07	09	04	02
1981	-	06	06	04	04	03	06	11	11	08	04	06
1982	02	07	10	05	01	05	03	07	04	02	01	10
1983	11	04	06	08	10	08	09	03	07	03	06	08
1984	07	06	07	06	01	06	05	00	07	00	00	10
1985	02	02	02	11	05	11	11	07	02	09	07	09
1986	09	06	05	02	06	05	06	04	12	04	04	06
1987	04	04	03	07	09	04	00	05	02	07	06	05
1988	05	04	07	12	02	06	05	00	00	00	02	02

- *Padangpanjang (PPI):*

L'activité de la faille autour de la station semble très intense si on fait l'hypothèse que le volcan G. Merapi qui est à 20 km de la station n'a pas d'influence. C'est de loin la station qui enregistre le plus d'événements très proches, pratiquement en continu, dans une zone marquée par de grands séismes historiques (voir ci-dessus).

- *Kepahiang-Bengkulu (KSI):*

Exceptées les années 1979 et 1980, l'activité sur cette portion de la faille de Sumatra (environ 50 km) est beaucoup plus faible qu'à Padangpanjang. On pourrait en déduire que le tronçon de faille autour de Bengkulu est bloqué et ne joue que par forts séismes comme celui de 1979. Ce point devrait être précisé par une étude sismologique plus détaillée de cette région.

Les autres stations du réseau permanent (KLI, GNI, TSI) n'ont pas mis en évidence une activité proche en liaison univoque avec le système de faille de Sumatra.

4. Conclusions préliminaires

- Une activité microsismique forte et très constante dans le temps a pu être mise en évidence à Padangpanjang: une part au moins de cette activité est à attribuer à la faille de Sumatra, à un endroit où l'étude de la sismicité historique démontre l'existence de ruptures majeures sur la faille;

- Une activité proche est discernable au Nord de Bengkulu, sur cette partie de la faille qui a joué en 1979 (voir ci-dessous);

- Une activité intermittente est observée à Banda Aceh (Nord de Sumatra);

- Enfin les stations de Parapat et Kotabumi montrent l'existence de séquences microsismiques en probable rapport avec la faille de Sumatra.

Pour la première fois, une activité microsismique de la faille de Sumatra sur plusieurs années est donc démontrée. En dépit d'une observation limitée à certains tronçons de la faille seulement, nous observons que cette activité semble forte et permanente dans certains secteurs au Nord et au centre de Sumatra, ce qui n'a pas pu être démontré au Sud. Cette observation irait dans le sens de déplacements plus rapides au Nord qu'au Sud de l'île, ce qui a été déduit des observations néotectoniques (voir rapport de *Sébrier et al.*, 1993).

C. Le réseau régional: l'étude de crises et répliques

1. Les ruptures principales et leurs répliques

Trois ruptures importantes ont été observées depuis l'installation des réseaux régionaux. Nous avons repris leurs temps d'arrivée, ainsi que ceux des principales répliques, afin de tenter des localisations relatives et de comparer ces localisations aux résultats déduits de la magnitude et des effets de surface. Ces séismes sont:

1977 (08/03): magnitude 6,0 ; épicentre 0,4°N - 99,7°E.

Ce séisme, aux effets locaux destructeurs (737 maisons détruites à Pasaman), a permis l'observation de traces en surface. Les isoséistes montrent une direction parallèle à la faille, une rupture se propageant vers le Nord depuis le Nord de la ville de Sinurut (NW de Padang).

1979 (15/12): magnitude 6,0 ; épicentre 3,5°S - 102,4°E.

Ce séisme est un des mieux documentés, à seulement 40 km de la station de Kepahiang. Ses isoséistes (Figure 2) montrent un lien évident avec la faille de Sumatra; le foyer est estimé être à une profondeur inférieure à 25 km. De nombreux édifices se sont effondrés à Kepahiang; des photos de traces en surface montrent les importants effets de surface qui doivent encore être observables sur le terrain. Une trentaine de répliques seront relocalisées, pour estimer la longueur de la zone de rupture et pour pouvoir faire d'éventuelles études statistiques sur les répliques. Dans ce but, nous avons pris dans les bulletins des stations de Bengkulu et de Padang les temps d'arrivée des ondes P et S. En 1979, la station de Kotabumi n'était pas encore en service.

1984 (27/08): magnitude 4,8 ; épicentre 1,8°N - 93,7°E.

Ce séisme de plus faible magnitude, présente l'intérêt d'avoir des isoséistes de direction d'allongement transverse à la faille, dans une zone de relais de celle-ci. Nous pensons pouvoir démontrer ici l'activité de structures transverses à la faille majeure, cartées auparavant sur images SPOT.

On a spécialement étudié le cas particulier de la sismicité du Sud de la faille de Sumatra. Plusieurs études ont montré que l'activité micro-sismique le long de ce segment de faille était particulièrement faible. Ce niveau d'activité était interprété comme pouvant être le résultat de plusieurs phénomènes: blocage du segment, vitesse de déplacement très faible depuis 1 Ma, faille jouant plutôt en extension qu'en coulissage etc... Une autre hypothèse

émise lors de travaux récents était que le mouvement de coulissage qui caractérise la faille de Sumatra ne commence qu'au sud de la ville de Bengkulu. Le mouvement de coulissage se faisant alors qu'au niveau de la faille de MENTAWAI pour la partie sud de Sumatra.

2. L'activité anormale au sud de Bengkulu

L'existence des deux stations sismologiques permanentes de Kotabumi (KLI) et de Bengkulu (KSI) est un facteur favorable à la détermination de séismes par le réseau local dans cette région. On a donc d'abord comparé les déterminations du réseau mondial et du réseau local.

- *Sismicité au sud Sumatra et réseau mondial*

On a répertorié les déterminations données par le réseau local sur quatre années de 1983 à 1986. Ensuite on a pris les temps d'arrivées aux deux stations pour les séismes les plus importants. Les résultats préliminaires semblent indiquer l'existence d'un nid de séismes entre l'île d'Enganno et la ville de Bengkulu. Il reste à confirmer par des calculs plus détaillés le décalage systématique qu'il y a dans cette région entre les localisations du réseau mondial et les localisations données par des stations proches. Ce décalage, s'il était prouvé, pourrait montrer que les quelques séismes qui se trouvent sur la faille de Semangko ont été localisés en mer par le réseau mondial, et enfin que les séismes localisés près de la côte sont plus éloignés en mer.

- *Quelques exemples:*

05 janvier 84 :

détermination locale: 5.1°S, 102.1°E, 33 km, magnitude 4.8;

réseau mondial: 5.12°S, 102.40°E, 33 km, magnitude 5.8.

09 janvier 86 :

détermination locale: 5.8°S, 104.1°E, 33 km, magnitude 4.8;

réseau mondial: 5.71S, 104.24E, 33 km, magnitude 4.6.

24 novembre 86 :

détermination locale: 6.25°S, 105.20°E, 33 km, magnitude 4.5;

réseau mondial: 6.76°S 105.56°E, 33 km, magnitude 4.2

D. Le réseau régional télémétré de Medan

Huit stations installées en 1990 autour du lac Toba (Table 1) offrent l'opportunité de confirmer l'activité microsismique de la faille de Sumatra dans ce secteur. Nous avons recueilli, en accord avec le BMG, les données de temps d'arrivée de ce réseau entre 1991 et 1993. Une étude préliminaire sur 5 mois faite par Rob McCaffrey montre une importante activité superficielle au sud du lac Toba, dans une direction SW-NE (ce qui pourrait montrer l'activité en faille normale de la partie sud du pull-apart à l'origine du cratère de Toba), et une activité importante sur la faille, aux environs de Tapanuli, donc près des segments actifs historiquement.

Ces points devraient être développés et argumentés par des études spécifiques dans le cadre d'un futur programme.

4. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

1. La grande faille de Sumatra est sismogénique: elle présente de grandes ruptures au moins sur certains tronçons; plusieurs zones présentent par ailleurs une activité microsismique plus ou moins continue, ce qui n'était pas clairement prouvé jusqu'à présent.

2. Des zones de rupture caractéristiques ('segments') sont déjà identifiables: au Nord de Kepahiang, dans la région du lac Singkarak, et au sud du lac Toba.

3. Il existe une probable interaction entre la subduction, la faille de Mentawai et la faille de Sumatra, au sud de Bengkulu.

Différentes perspectives sont ouvertes:

- Comparer épicentres et tracés de faille avec précision, pour faire un lien clair avec la présence de pull-apart le long de la faille, et démontrer leur rôle sur les segments actifs susceptibles de générer de grandes ruptures (rôle d'aspérités?);

- Mieux exploiter les données du réseau mondial par une relocalisation des événements majeurs en utilisant toutes les stations régionales;

- Mieux décrire la segmentation de la faille et tenter d'estimer (1) la part éventuelle de "creeping" sur les tronçons de la faille; (2) la durée des cycles intersismiques; (3) les zones à risques en fonction de ces résultats.

Remerciements

Ce travail a été effectué dans le cadre de l'accord de coopération entre la Délégation aux Risques Majeurs et le Direktorat Jendral Geologi dan Sumber Daya Mineral (Directorate General of Geology and Mineral Ressources) sur la Grande Faille de Sumatra qui a été signé en Juillet 1987 et fut prorogé en Juin 1991. Nous tenons à remercier le Bidan Meteorologi dan Geofisik (BMG) pour l'accès à ses données sismologiques et en plus particulièrement les docteurs Prih Hariadi et R. Soetardjo pour leur aide précieuse et leur accueil.

L'étude présentée dans ce rapport est financée par le Secrétariat d'État auprès du Premier Ministre Chargé de l'Environnement et de la Prévention des Risques Technologiques et Naturels Majeurs, Délégation aux Risques Majeurs (DRAEI), France.

Nous remercions aussi:

- Direktorat Jendral Geologi dan Sumber Daya Mineral
- Puslitbang Geoteknologi-LIPI, Bandung;

Nous sommes également redevables envers les personnes suivantes pour leur aide:

- Mademoiselle Chevrier et Monsieur Deneufbourg (DRM);
- Mme Laude et Mme Tanguy (CEPHYTEN);
- Dr Adjat Sudradjat (DGGMR);
- Dr Hery Harjono (RDCG-LIPI).

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Bellier O., (1990). - Etude tectonique du système de Faille de Sumatra (Indonésie): l'analyse de documents satellitaires (Spot, Landsat et Radar) contrainte par des données de terrain. Rapport CNES (1 Oct. 1989 -30 Mars 1990); Tome I, 28p.
- Bellier O., (1991). - Etude tectonique du système de Faille de Sumatra (Indonésie): l'analyse de documents satellitaires (Spot, Landsat et Radar) contrainte par des données de terrain - Comparaison avec les failles actives de l'Ouest des USA-. Rapport CNES (1 Mars 1990 -30 Mars 1991); Tome II, 26p.
- Bellier O., Sébrier M., et Pramumijoyo S. (1991a) - La Grande Faille de Sumatra: Géométrie, cinématique et quantité de déplacement mises en évidence par l'imagerie satellitaire. C. R. Acad. Sci. Paris, t. 312, série II, 1219-1226.
- Bellier O., Sébrier M., et Pramumijoyo S. (1991b) - Strike-slip faulting and volcanic calderas along the Great Sumatran fault. Terra abstracts, v.3, n°1, 1991a, p.266.
- DeMets C. , Gordon R. G., Argus D. F. et Stein S. (1990). Current plate motions, Geophys. J. Int., 101, , p.425-478.
- Diament, M., Harjono, H., Dahrin, D., Deplus, C., Gérard, M., Karta, K, M., Lassal O., Mallot J., Martin, et A., Zen, M.T, Jr., (1991) - Deformation of the Sumatra sliver platelet, western Indonesia: Results of the Mentawai cruise. Terra abstracts, 3 (1), March 1991, 256.
- Diament, M., Harjono, H., Karta, K, Deplus, C., Dahrin, D., Zen, M.T, Jr., Gérard, M., Lassal O., Martin, A., et Mallot J., (1992) - Mentawai fault zone off Sumatra : A new key to the geodynamics of Indonesia. Geology, v.20, 259-262.
- Duquesnoy Th., Bellier O., Kasser M. et Sébrier M. (1992). Etude géodésique de la partie centrale et méridionale de Sumatra (Indonésie) : contribution à l'étude sismotectonique de la faille de Semangka. Rapport du programme de coopération Franco-Indonésien (DRM/Ministère de l'environnement).Publication I.G.N., n°60.405, 69pp. + Annexes.
- Katili, J. A., Sudradjat, A. et Kertapati, E. (1987) - Evidence of active transcurrent movement along the Great Sumatran fault-zone during the Tarutung earthquake of April, 1987. Abstract: VI Regional Congress of Geology, Mineral and Hydrocarbon Resources of Southeast Asia, Jakarta.
- McCaffrey R. (1991). Slip vectors and stretching of the Sumatran fore-arc, Geology, 19, p.881-884.
- Pramumijoyo, S. et Sébrier, M. (1989) - Fault kinematics around the Sunda strait, Indonesia. Abstract. Terra Abstracts, 1 (1), March 1989.
- Pramumijoyo, S., Sébrier, M., et Bellier O. (1990) - Variation du régime tectonique miocène à actuel associé à la faille de Sumatra, RST, Grenoble, Avril 1990.
- Pramumijoyo S. et Sébrier M. (1991) - Neogene and Quaternary fault kinematics around the Sunda strait, Indonesia, Journ. SE Asian Earth Sc., (sous press).
- Sébrier M, Pramumijoyo S. et Bellier O. (1989) - Etude néotectonique de la faille active de Semangka (Indonésie) : utilisation de la méthode des tranchées en domaine tropical humide. Rapport du programme de coopération Franco-Indonésien (DRM/Ministère de l'Environnement).129p.
- Sébrier M, Bellier O. et Pramumijoyo S. (1991) - Late cenozoïc fault kinematics within the southernmost region of the Great Suamtran fault - Indonesia. Terra abstracts, 3 (1), March 1991.
- Untung, M., Burg, N., Kertapati, E., Undang, et Allen, C.R. (1985) - Rupture along the Great Sumatran fault, Indonesia, during the earthquakes of 1925 and 1943. Bull. Seismol. Soc. Am., 75, 313-317.

**ANNEXE 1 : Nombres de séismes par populations suivant les différences de S-P
aux stations analogiques de Sumatra.**

Les stations analysées sont : BSI (Banda Aceh);
 PSI (Parapat);
 PPI (Padangpanjang);
 KSI (Bengkulu-Kepahiang).

Les localisations de ces stations sont sur la figure 1.

BSI Banda Aceh

Ligne 1 <S-P<3.5s Lign 2 <6s Lign 3 <9s Lign 4< 15s Lign 5 1°<di<1.4°

Ans 01 02 03 04 05 06 07 08 09 10 11 12

Année cumulée 81, 83, 92

1979	00	00	00	-	-	-	-	-	00	00	01	00
	00	03	00	-	-	-	-	-	00	00	00	00
	00	02	05	-	-	-	-	-	01	05	00	04
	24	09	13	-	-	-	-	-	12	14	12	07
	20	10	38	-	-	-	-	-	08	25	16	05

1980	00	00	00	00	03	01	00	02	01	01	00	00
	01	00	01	01	11	00	00	00	01	01	00	04
	07	01	09	01	05	03	00	00	00	06	04	02
	07	04	12	05	11	10	10	04	05	06	12	09
	14	06	14	16	13	10	14	05	09	18	18	12

janv Fev 50% Aout 75%

1981	01	01	01	10	07	03	11	04	04	02	00	00
	02	01	01	11	09	07	11	07	05	02	01	01
	06	03	04	14	12	10	14	12	10	02	06	01
	16	14	11	30	36	16	32	29	23	06	16	09

1982	05	00	01	00	03	01	00	04	00	04	01	04
	00	00	00	00	00	00	00	01	00	00	01	00
	02	02	06	05	03	03	04	03	00	04	04	02
	09	34	13	14	16	07	14	10	06	14	13	17
	09	07	16	29	08	16	09	13	09	17	19	06

1983	03	11	11	08	09	02	00	00	00	00	00	00
	05	15	11	08	09	03	00	01	01	00	00	00
	06	16	16	12	17	08	02	05	06	01	04	00
	14	20	23	179	99	33	48	33	38	26	27	20

040483 02H51 5.80N 93.27E 51 KM 6.6 Mb VIII BANDA ACEH

150583 05h43 5.24N 95.73E 33 Km Mb 3.8

1992	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00
	00	03	00	00	01	01	01	00	00	00	00	00
	03	04	00	01	01	02	01	00	02	01	00	01
	07	09	08	06	12	05	07	09	12	07	02	09

PSI Parapat

Ligne 1 <S-P<3.5s Ligne 2 <6s Ligne 3 <9s Ligne 4< 15s

Cumulé:80,82,83,85,86,88.

Ans	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
1979	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00
	00	00	01	00	00	01	00	00	01	00	01	00
	00	00	02	01	00	01	02	00	00	00	01	00
	01	00	01	00	00	02	03	01	00	03	00	01
1980	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00
	00	00	00	00	01	01	00	00	00	00	00	00
	00	01	02	02	01	01	04	00	01	02	01	00
	04	01	03	04	03	03	07	03	01	02	04	00
1981	-	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00
	-	00	01	00	00	00	00	00	00	02	01	00
	-	00	01	01	00	00	00	01	00	00	00	00
	-	01	00	00	01	03	04	04	02	01	01	03
1982	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00
	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00
	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00
	02	00	01	00	00	00	02	00	00	01	00	02
1983	00	00	00	00	00	01	00	00	00	00	00	00
	01	00	00	00	01	03	00	00	00	00	00	00
	01	00	00	00	05	03	02	00	00	00	00	00
	00	01	02	07	04	05	03	04	02	00	01	00
1984	00	00	01	19	00	00	02	00	00	10	00	00
	00	00	02	04	00	00	00	01	00	00	00	00
	01	01	00	00	02	00	01	00	00	01	00	00
	03	04	03	12	01	00	04	02	01	00	00	00
1985	00	00	08	00	02	00	00	00	00	00	00	00
	00	00	08	00	03	01	00	00	00	00	00	00
	01	00	09	01	04	02	00	00	02	00	01	00
	02	03	11	01	06	09	03	02	05	02	05	02

1986	00	00	00	00	00	00	00	03	00	00	00	00
	00	00	01	01	00	00	00	04	00	00	00	00
	00	02	03	02	00	00	00	05	02	00	00	00
	02	02	06	06	02	01	00	12	03	03	01	02
1987	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	01	00
	01	00	02	02	04	00	01	00	01	02	09	02
	00	01	01	00	01	00	00	00	01	00	01	00
	02	03	03	05	01	01	02	02	02	01	01	01
1988	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00
	01	00	00	01	06	01	00	00	02	01	00	00
	02	00	01	01	07	01	01	00	02	03	00	00
	02	03	02	02	12	04	02	03	04	03	01	01

PPI 00°27'24.6"S 100°23'49.2" 784 M PADANGPANGJANG

Ligne 1 <S-P<3.5s Ligne 2 <9s Ligne 3 <15s

Cumulé:81,82,84,86,88,90

Mois	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
1980	12	08	04	17	13	02	05	15	22	12	05	05
	09	10	11	07	17	05	04	05	05	02	09	05
	06	07	06	13	06	03	04	04	06	07	02	02
1981	04	07	07	04	04	00	00	00	02	13	03	04
	09	11	13	08	10	03	03	03	05	01	63	20
	10	16	25	13	20	13	18	15	11	22	103	36
1982	04	01	10	03	03	04	00	00	01	01	00	00
	20	04	14	07	10	09	01	06	04	04	02	01
	31	12	28	13	21	14	06	12	15	1	06	04
1983	01	06	09	03	01	00	00	00	00	01	01	03
	03	08	01	04	05	07	05	04	06	06	05	09
	06	03	03	07	06	03	09	07	07	07	06	11
1984	03	13	04	18	17	14	43	23	22	11	10	22
	07	16	09	26	20	21	93	33	26	14	17	35
	14	31	17	31	25	32	101	36	31	20	24	43
1985	04	10	18	17	07	14	07	22	12	02	04	03
	22	11	08	16	09	19	07	06	05	04	02	02
	11	10	05	05	08	10	03	03	06	04	03	02
1986	03	05	00	00	01	00	01	02	16	03	03	02
	11	16	07	05	04	03	04	92	31	06	05	08
	16	19	09	10	12	07	09	95	37	10	07	15
1987	22	02	05	34	10	08	07	06	09	02	05	05
	23	19	26	65	32	32	21	07	12	10	12	14
	09	07	07	04	07	03	04	02	05	04	05	10
1988	06	01	03	51	17	06	06	14	21	15	28	25
	20	18	21	61	30	33	22	35	48	31	60	53
	22	24	31	72	31	41	30	47	53	43	73	60
1989	03	03	02	02	03	06	08	05	01	03	00	05
	30	12	30	36	18	19	19	13	13	15	09	13
	09	03	06	08	06	03	06	02	06	04	06	04
1990	03	03	06	02	03	14	10	09	11	17	25	1
	10	09	17	11	07	18	22	16	30	33	37	27
	14	11	22	19	16	22	32	21	32	40	43	39
1991	13	07	04	02	00	00	03	13	02	11	08	03

08	10	06	10	03	02	04	04	18	05	07	02
08	00	05	08	06	06	04	03	08	05	04	04

BKI 03°39'04"S 102°35'07" 517 M BENGKULU

LIGNE 1 S-P<3.5s LIGNE 2<6s LIGNE 3<9s LIGNE 4 <15s

Cumulé: 80,82,83,85,87,88,89

Ans	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
1980	01	03	01	00	00	01	00	00	00	00	00	00
	10	05	07	01	02	02	01	00	03	00	00	01
	14	08	09	02	05	07	01	01	06	00	02	01
	29	17	13	04	11	12	06	04	19	05	07	05
1981	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00
	00	00	00	02	01	01	00	00	01	00	00	04
	03	02	03	01	00	00	00	01	03	02	01	03
	08	04	06	04	04	08	03	05	08	06	04	03
1982	00	00	02	00	01	00	00	00	00	00	00	01
	01	03	05	00	03	01	00	01	00	01	00	02
	03	04	07	01	07	01	00	01	02	03	01	04
	09	05	12	08	09	11	03	06	07	06	04	10
1983	00	00	02	00	03	02	00	03	01	01	03	02
	03	00	05	03	04	03	00	04	01	02	03	03
	06	02	08	06	05	07	01	06	01	02	04	03
	11	09	15	15	10	10	07	09	06	08	06	04
1984	00	00	00	00	00	01	02	00	00	-	00	00
	02	01	00	02	02	00	00	00	01	-	00	03
	00	02	02	02	02	02	00	00	02	-	01	02
	09	08	09	05	06	04	04	09	03	-	02	07
1985	00	00	00	01	-	-	-	-	-	-	00	00
	02	02	02	01	-	-	-	-	-	-	01	02
	03	03	02	01	-	-	-	-	-	-	01	04
	08	04	07	01	-	-	-	-	-	-	01	07
1986	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00
	01	02	01	02	02	00	00	01	00	00	00	00
	00	01	01	01	01	01	01	00	01	01	00	01
	08	03	08	04	03	03	03	08	08	04	04	04
1987	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00
	00	01	00	01	00	00	00	00	00	01	00	00
	00	02	00	01	00	00	00	01	00	01	03	02
	08	03	05	03	02	04	00	03	01	05	08	07

1988	00	00	00	01	00	00	00	00	00	00	00	00
	00	00	00	01	00	00	00	01	00	01	00	01
	04	03	00	01	00	00	00	01	00	01	00	01
	06	06	05	03	00	00	00	02	02	01	01	02
1989	00	00	00	00	00	00	00	05	02	08	00	00
	00	01	00	03	01	03	02	05	06	10	00	01
	01	02	01	03	01	03	02	07	09	11	00	01
	08	06	03	07	05	08	06	09	16	13	00	07
1990	01	00	00	00	00	00	00	00	00	01	00	00
	00	00	01	00	00	02	01	01	01	02	01	02
	02	00	02	02	00	00	00	01	01	02	01	00
	03	00	05	04	03	02	02	03	04	02	04	06

ANNEXE 2 : Crise sismique du 15/12/1979 enregistrée aux stations de PPI et KSI

Les localisations de ces stations sont sur la figure 1.

Station PPI (Padang) crise 151275 1
*791215 000336.3 IPGU 81.5 ISG 4.0°
791215 002109.0 IPG 58.0 ISG 4.1°
791215 003733.5 EPG 83.0 ISG 4.0 4.4°
791215 004138.0 EPG 85.0 ISG 3.8 4.1°
791215 010011.0 IPG
791215 010734.0 IP
791215 012156.0 IPG
791215 021414.5 IP
791215 030723.5 EP
*791215 032055.0 IPGU 107.5 ISG 4.2 1.6°
*791215 042924.5 IP
*791215 050324.5 EP
*791215 052010.0 EP
*791215 061903.5 IPU 62.5 IS 4.5 5.0°
*791215 081655.5 IP
*791215 084059.5 EPG 114.0 ISG 3.8 4.8°
791215 092644.0
*791215 101152.0 EP
*791215 113911.0
*791215 114804.5 EPG 55.0 ISG 3.8 4.2°
*791215 130746.5 IPG 96.0 ISG 4.2°
*791215 141158.0 IPG 116.0 ISG 4.3 5.0°
*791215 153856.0 EP
*791215 163418.0 IPG 64.5 ISG 4.1 4.1°
*791215 181548.5 EPG 93.8 ISG 3.9°
*791215 191039.5 IP
*791215 193109.0 EP
*791215 193441.5 EP
791216 002353.8 IPG
*791216 013536.0 IPG 90.5 ISG 3.9 4.7°
*791216 043605.0 IPG 56.1 ISG 3.5 4.4°
*791216 052429.5 IPGU 75.0 ISG 3.8 4.0°
*791216 081538.0 IPG 91.0 ISG 3.8 4.6°
*791216 091036.5 IPG 85.6 ISG 3.8 4.2°
*791216 130217.5 IPG 65.0 ISG 4.1°
*791216 140532.5 IPG 83.6 ISG 4.1°
*791216 165737.5 IP
*791216 170254.0 IPU 101.0 ISG 4.0 4.0°
*791217 000453.5 IPG 109.8 ISG 3.9 4.9°
*791217 013405.6 IPG 64.5 ISG 4.2 5.1°
*791217 015319.0 IPG 71.5 ISG 3.9 4.6°
*791217 020606.5 IPG 63.5 ISG 3.6 5.0°
*791218 014131.6 IPG 85.5 ISG 3.4 4.7°
*791218 070627.8 IPG 76.0 ISG 3.5 4.2°
*791218 182028.1 IPG 81.2 ISG 4.7°
*791218 192456.4 IPGU 110.5 ISG 4.8 4.7°
*791218 193754.0 IPG 104.0 ISG 4.3°
*791218 203238.0 IPG 92.0 ISG 4.6°
*791218 231648.5 IPG 100.7 ISG 4.5°
*791219 051922.0 IPG 81.5 ISG 3.9 5.2°
791221 210238.2 IPGU 79.0 ISG 3.9 3.5°
*791222 021354.0 IPG 113.5 ISG 4.2 5.2°
*791222 235851.5 IPG 115.5 ISG 4.3 5.6°
791224 205338.5 IP
*791225 091245.5 IPG 108.0 IS
791225 155007.2 IPG 49.5 ISG 3.7 3.6°
*791226 124434.6 IPGU 90.0 ISG 4.7 4.8°
791227 062619.5 IPG
*791227 230232.5 IPG

*800102 121130.0 EP 77.0 ES
*800103 080016.5 IPU 47.0 IS 3.3 2.6°
*800104 091529.0 IP TELESEISME ?
*800110 054620.0 IP TELESEIMSE ?

Station Kepahiang (Bengkulu) crise 151279

1

3°39'S 102°34'E KPI Kepahiang (Bengkulu)

*791215 000246.0 IPU
791215 013013.0 IP
791215 013134.0 IP
791215 013203.5 IP
791215 013344.5 IPD
791215 014133.5 IPU
791215 014207.0 IP
791215 014401.0 IP
791215 014536.5 IP
791215 014645.5 IPD
791215 014657.5 IP
791215 015041.0 IP
791215 015320.5 IPD
791215 015345.5 IP
791215 015459.0 IP
791215 015603.0 IPU
791215 015756.0 IP
791215 015819.0 IP
791215 022046.0 IP
022519.0 IP
022946.0 IP
023038.0 IP
023345.0 IP
024155.0 IP
024931.0 IP
025244.0 IP
025519.0 IP
025553.0 IP
030011.5 IP
030310.5 IPD
030430.5 IP
031118.0 IP
031150.0 IP
MAINTENANT EV AVEC FIRST MOTION
ET S
031403.5 IPD
*791215 032004.2 IPU
032447.2 IPU
033003.5 IPU
033212.5 IPU
033857.0 IPD
034104.0 IPU
034405.0 IPU 08.0 IS
034523.0 IPU
034549.0 IPU
034644.0 IPU 47.5 IS
034914.0 IPD
035333.5 IPU 35.5 IS
035817.0 IPU 20.0 IS
041132.8 IPU
*791215 042825.8 IPU 27.0 IS
044027.0 IP 31.5 IS
044146.0 IP 49.5 IS
045236.5 IPU 40.5 IS
045349.0 IP 52.5 IS
045801.0 IPD

045927.5 IPU
050104.8 IPD 11.7 IS
050132.0 IP 34.5 IS
*791215 050229.0 IPD 33.5 IS
050708.5 IPD
051241.5 IPD
051403.0 IPD
*791215 051911.5 IPD
052439.0 IPU
054202.5 IPD
054441.5 IPU
054641.5 IPU
055550.0 IPD
055830.5 IPU
055918.0 IPU
060015.7 IPD
060341.0 IPU
*791215 061813.0 IPD 16.0 IS
PHASE p ET s SEULEMENT
065726.0 IPU 45.0 IS
065837.5 IPU 44.0 IS
070352.5 IPU 54.5 IS
070453.0 IPU 55.5 IS
070536.5 IPD 38.5 IS
072324.5 IPD 29.0 IS
073725.5 IPU 29.0 IS
073932.8 IPU 33.5 IS
*791215 081601.5 IPD 03.5 IS
081755.5 IP 58.0 IS
082638.5 EP 50.5 IS 2.8 0.9°
*791215 084008.5 IPD 13.0 IS 0.0 0.3°
090527.0 IPD 31.0 IS
090750.5 IPD 52.5 IS
090907.0 IP 10.0 IS
091857.0 IP 62.0 IS
092227.5 IPU 28.8 IS
093638.5 IPU 39.5 IS
093737.0 IPU 39.0 IS
093746.0 IP 53.5 IS
094551.5 IPU 53.0 IS
*791215 101055.0 IPU 58.5 IS
102034.5 IPD 40.5 IS
103355.0 IPD 58.0 IS
105907.0 IP 14.0 IS
*791215 113809.8 IPU 11.3 IS
114047.5 IPU 48.7 IS
114643.0 IPD 46.7 IS
*791215 114717.0 IPD 21.5 IS
121428.5 IPU 32.5 IS
123322.0 IPU 28.5 IS
*791215 130657.0 IPU
133030.5 IPU 36.5 IS
134754.5 IPD 59.0 IS
*791215 141107.0 IPU
141347.0 IPU 49.5 IS
141415.0 IPU 19.5 IS
141637.0 IPU 43.5 IS
145137.0 IPD 39.0 IS

160917.5 IPU 22.0 IS
 162415.0 IPU 19.5 IS
 *791215 163330.0 IP
 165713.5 IP 17.0 IS
 *791215 181450.0 IPD 55.5 IS 0.2°
 185142.5 IPD 45.0 IS
 *791215 190942.0 IPU 47.0 IS
 *791215 193018.3 IPD
 *791215 193343.5 IPU
 195608.7 IPD 10.2 IS
 195748.7 IPD 54.5 IS
 201344.8 IPU 61.0 IS
 202343.6 IPU 54.2 IS
 211732.3 IPD 34.0 IS
 222250.0 IPU 54.5 IS
 223427.5 IPU 37.0 IS
 225501.7 IPU 06.2 IS
 230101.5 IPU 04.5 IS
 230302.5 IPU 12.0 IS
 232130.5 IPD 32.0 IS
 233911.0 IPD 20.5 IS
 233941.5 IPD 43.0 IS
 791216 001537.2 IPU 41.7 IS
 791216 003527.5 IPU 32.5 IS
 791216 005046.8 EPD 53.0 IS
 005205.5 IPD 07.5 IS
 011819.0 IPU 21.7 IS
 *791216 013445.7 IPU 48.0 IS
 014939.0 IPD 43.0 IS
 024303.7 IPD 06.0 IS
 025305.5 IPD 08.5 IS
 025435.0 IPD 40.0 IS
 031127.0 IPD 31.0 IS
 031245.5 IP 47.5 IS
 032418.0 EPU 23.0 IS
 033841.4 IP 45.0 IS
 034928.8 IPU 32.5 IS
 035111.5 IPD 20.0 IS
 041805.5 IPU 09.5 IS
 041905.0 IPU 07.5 IS
 043453.0 IPD 62.5 IS
 *791216 043509.0 IPU 14.5 IS
 044339.0 IPD 44.0 IS
 044402.0 IPD 05.0 IS
 044612.0 IPU 16.0 IS
 044629.0 IP 36.0 IS
 044926.2 IPD 29.7 IS
 *791216 052334.0 IPD 35.5 IS
 060235.0 IPD 36.0 IS
 061558.0 IPD 62.0 IS
 065054.0 IPD 54.5 IS
 065305.3 IPD 15.0 IS
 072819.6 IPU 23.6 IS
 *791216 081448.5 IPD 52.0 IS
 081809.0 IPD 10.5 IS
 084742.0 IP 47.0 IS
 *791216 090936.5 IPD 42.5 IS
 103814.5 IPD 17.5 IS
 111901.7 IPU 06.0 IS
 125540.7 IPU 43.5 IS
 125719.2 IPD 21.7 IS
 *791216 130119.5 IPD 24.3 IS
 130922.2 IPU 29.2 IS
 131502.5 IP 07.5 IS
 135902.3 IPU 12.0 IS
 *791216 140436.5 IPU 41.2 ISS
 141414.3 IPU 18.3 IS
 143516.8 IPU 22.8 IS
 144614.2 IPD 19.2 IS
 144826.5 IPD 30.0 IS
 150413.5 IP 17.5 IS
 154009.0 IPD 12.0 IS
 162542.5 IPD 44.0 IS
 *791216 165646.0 IPD 47.5 IS
 *791216 170205.2 IPU 07.0 IS
 173426.2 IPU 29.2 IS
 173537.3 IPU 39.5 IS
 173702.0 IPD 04.5 IS
 174733.8 IPU 36.0 IS
 175140.5 IPU 47.0 IS
 203254.0 IPD 57.0 IS
 203415.0 IPU 17.5 IS
 210357.0 IPU 60.0 IS
 210704.0 IPU 09.0 IS
 *791217 000406.8 IPU 15.0 IS
 791217 005317.0 IP 26.0 IS
 *791217 013305.3 IPD 09.2 IS
 791217 014540.0 IPD 43.0 IS
 *791217 015210.0 IPD FELT II III MMI
 *791217 020505.5 IPU III MMI
 791217 022731.2 IPD 33.2 IS
 791217 022907.8 IP 10.0 IS
 791217 025816.0 IPD 18.5 IS
 791217 043916.8 IPD 21.0 IS
 791217 052649.0 IPD 50.5 IS
 791217 094531.6 EPU 35.0 ES
 791217 104232.5 IPU 36.5 IS
 791217 171919.4 IPU 22.5 IS
 791217 204622.0 EPU 36.0 ES
 *791218 014041.0 IPU
 791218 054825.5 EP 34.0 ES
 *791218 070536.6 IPU 41.2 IS
 791218 112233.5 IPU 37.8 IS
 791218 131813.0 EP 19.0 ES
 *791218 181937.5 IPU 44.0 IS
 *791218 192409.0 IP 13.5 IS
 *791218 193641.0 IPD 65.0 IS
 *791218 203137.8 IPU 42.0 IS
 791218 223749.0 IPU 62.3 IS
 *791218 231559.5 IPU
 791219 003508.0 IPD 15.3 IS
 *791219 051833.7 IPU 37.5 IS
 791219 072236.0 IPU 40.0 IS
 791219 181413.7 IP 17.5 IS
 791220 120544.5 EP 50.7 ES
 791220 170430.0 EPD 41.0 ES

791221 061534.0 IP 35.0 IS
791221 081254.5 IP 57.0 IS
791221 223510.5 IPD 14.5 IS
791221 230240.5 IPU 45.0 IS
*791222 021301.2 IPD 09.5 IS
791222 070323.2 EPU 31.6 IS
791222 122344.0 EPD 50.7 ES
791222 142314.5 EP 24.5 ES
791222 144145.5 EP 52.0 ES
791222 145618.2 EP 24.3 ES
791222 202442.0 EP 49.5 ES
*791222 235802.0 IPU 07.8 IS
791223 082338.0 IPU 41.0 IS
791223 102829.4 EP 36.3 ES
791223 115458.0 EP 64.0 ES
791223 130632.0 EP 42.7 ES
791223 144101.0 IPD 08.5 IS
791223 201431.3 IP 37.3 IS
791224 025828.0 EP 36.5 ES
791224 054113.5 EP 20.8 ES
791224 055931.5 IPU 34.0 IS
791224 063136.4 IPU 41.0 IS
791225 071313.0 IPU 17.0 IS
791225 073204.7 IPU 08.3 IS
791225 074920.5 IPU 27.5 IS
791225 075025.3 IPU 29.0 IS
791225 080141.2 IPU 46.8 IS
791225 085043.0 IPU 48.9 IS
*791225 091154.0 IPU 59.0 IS
791225 110010.8 IPU 13.5 IS
791225 114742.8 IPU 48.0 IS
791225 114804.0 IP 07.5 IS
791225 131621.0 IPU 24.0 IS
791225 170916.2 IPU 18.5 IS
791225 193341.0 IPD 44.0 IS
791225 200410.9 IPD 13.9 IS
791225 200941.0 IPD 43.2 IS
791225 215416.5 IPD 19.0 IS
*791226 124348.0 IPD 59.5 IS
791226 175219.0 IPU 25.5 IS
791226 220045.0 IPU 49.2 IS
791227 085501.0 IPD 05.5 IS
791227 121435.5 IPD 39.5 IS
791227 180643.6 IPU 48.0 IS
791227 191930.0 IPU 38.5 IS
791227 192428.0 IPU 31.0 IS
791227 212536.0 IPD 44.0 IS
*791227 230247.5 IP 85.0 IS
791227 230601.5 IP 10.5 IS
791228 031715.5 IPD 17.0 IS
791228 052319.5 IPD 22.0 IS
791228 204730.5 IPD 35.0 IS
791229 020026.0 IPD 28.5 IS
*791229 102013.7 IPD
791229 230645.5 IPU 47.5 IS
791230 001151.0 IPD 53.3 IS
791230 003224.0 IP 32.0 IS
791230 192217.2 IPD 21.8 IS

791230 203529.0 IPU 34.0 IS
791230 212125.0 IPU 29.0 IS
791230 212235.3 IPU 37.0 IS
791231 131117.3 EPU 22.0 ES
800101 012411.5 IPD 17.5 IS
800102 041904.5 IPU 07.5 IS
*800102 121034.7 IPD 37.0 IS
800102 234922.0 IP 26.5 IS
800103 062836.2 IPU 40.2 IS
*800103 075958.0 IP 61.5 IS
800103 235930.5 IP 34.5 IS
*800104 091502.5 IPU 12.5 IS
800104 093453.9 IP 59.0 IS
800104 095032.5 IPD 36.0 IS
800105 003646.2 IP 51.6 IS
800105 200344.3 IPD 48.0 IS
800106 074437.5 IP 46.0 IS
*800110 054448.5 IPU 52.7 IS

CONCLUSIONS GÉNÉRALES ET PERSPECTIVES

Les travaux de recherche pluridisciplinaires (néotectonique, géodésie et sismologie) qui ont été effectués le long de la Grande Faille de Sumatra ont permis d'estimer les principaux paramètres de l'aléa sismique qui lui est associé. En particulier, la segmentation de ce système de faille a pu être caractérisée et en conséquence, on a pu estimer les magnitudes maximums liées à la Grande Faille de Sumatra. Parallèlement, on a montré que la vitesse de la Grande Faille de Sumatra augmentait vers le nord ce qui implique que l'ordre de grandeur approximatif des périodes de retour (ou récurrence) des grands séismes destructeurs diminue vers le nord de Sumatra. De manière à comprendre le mécanisme de la déformation le long de la Grande Faille de Sumatra, nous avons effectué une première campagne de mesures géodésiques. Enfin, ces travaux ont été complétés par des études sismologiques qui ont confirmé l'ordre de grandeur des longueurs de rupture des séismes majeurs et mis clairement en évidence la présence d'une activité microsismique sur cette Grande Faille de Sumatra.

Les études néotectoniques ont notamment permis de préciser la géométrie et la cinématique de la Grande Faille de Sumatra. Celle-ci est caractérisée par des segments qui forment généralement des relais extensifs dextres. Ces relais correspondent à des dépressions bordées par des failles décrochantes dextres ou normales dans lesquels se sont localisés des complexes volcaniques, notamment des grandes caldeiras de formes géométriques particulières (elliptiques à rectangulaires), comme la caldeira de Toba qui est la plus grande du monde. A Sumatra, l'analyse cinématique des plans de failles récentes montrent que de part et d'autre de la Grande Faille de Sumatra, la compression est orientée NNE à NE-SW. En revanche, le long de la zone de faille, la direction de la compression est plus proche de N-S; cependant, on observe fréquemment des failles normales qui indiquent une extension E-W à NW-SE ("pull-apart" grabens ou relais). Concernant l'aléa sismique, les études néotectoniques ont permis plus particulièrement de préciser les points suivants :

Segmentation et magnitude maximum

Les premiers travaux réalisés sur la terminaison méridionale de la Grande Faille de Sumatra (Faille de la Semangka) avaient permis, grâce à l'observation de tranchées, d'estimer une magnitude maximum de M_w 7,3 pour ce segment méridional. L'analyse des cartes topographiques disponibles et des images satellites (cf. 1^{ère} partie), nous ont permis de préciser la segmentation de la Grande Faille de Sumatra entre le Nord du lac Toba ($3^\circ N$) et le détroit de la Sonde ($6^\circ S$). La grande majorité des segments ont une longueur moyenne qui est de 80 ± 10 km et quelques rares segments ont des longueurs qui peuvent atteindre 130-150 km. Nous avons donc calculés, en passant par le moment sismique, deux estimations de magnitudes maximums pour respectivement 80 et 150 km :

$$M_{wmax}=7,4-7,5 \text{ pour } 80 \text{ km et } M_{wmax}=7,6-7,7 \text{ pour } 150 \text{ km}$$

Estimation des intervalles de récurrence

Les déterminations de la vitesse de la Grande Faille de Sumatra permettent d'estimer approximativement l'ordre de grandeur des intervalles de récurrence entre les grands séismes destructeurs (cf. 1^{ère} partie). Compte tenu des vitesses calculées près des lacs Toba (23 ± 2 mm/a) et Ranau (9 ± 1 mm/a), nous avons pu estimer les ordres de grandeur des intervalles de récurrence respectivement à **400 ± 200 ans (vers $5^\circ S$)** et **160 ± 80 ans (vers $2^\circ N$)**. Si la vitesse de 19 ± 2 mm/a, calculée près du lac Singkarak est correcte, l'intervalle de récurrence pour la partie centrale de la Grande Faille de Sumatra (région de Padang) serait de l'ordre de 200 ± 100 ans. Ces estimations sont en accords avec les données de la sismicité historique et instrumentale qui signalent plus de tremblements de terre dans la région située au Sud du lac Toba (Tapanuli-Tarutung...) que dans le Sud de Sumatra. Ces observations sont aussi en accord avec l'augmentation de la vitesse de la Grande Faille de Sumatra vers le Nord.

Les études géodésiques ont permis d'instrumenter deux zones au travers de la Grande Faille de Sumatra: Padang-Singkarak (vers $1^\circ S$) et Ranau-Liwa (vers $5^\circ S$). Dans chacune des zones ont été mesurés respectivement par géodésie classique terrestre un réseau à maille étroite (environ 4 km entre les points) et par géodésie spatiale **GPS** un réseau à maille large (environ 40 km entre les points). Les points GPS sont actuellement localisés avec une précision d'un centimètre qui sera nettement améliorée lors de la remesure (précision attendue de l'ordre du millimètre). Compte tenu des vitesses "long-terme" de l'ordre du centimètre que nous avons déterminées, on devrait pouvoir détecter des déplacements significatifs vers 1995. Ces mesures permettront de déterminer s'il y a du 'creep' le long de certains segments de la

Grande Faille de Sumatra et de voir si la déformation "instantanée" est distribuée au travers, ou localisée le long, du système de faille.

Les études sismologiques ont permis de déterminer le long de la Grande Faille de Sumatra la présence de nids d'activité microsismique, plus ou moins permanents, qui n'étaient pas clairement prouvés jusqu'à ce jour (cf. 2^{ème} partie). De plus, l'analyse de la sismicité historique de l'île de Sumatra montre que cette Grande Faille de Sumatra présente de grandes ruptures, au moins sur certains tronçons comme Singkarak, le sud du lac Toba... L'analyse en cours, des données des réseaux régionaux, devrait préciser la localisation des épicentres dans la région du lac Toba et en particulier le rôle possible des "pull-aparts" comme aspérités entre des segments actifs.

Perspectives

Les recommandations et les perspectives suivantes sont proposées pour compléter les résultats acquis dans le cadre de ce programme :

- L'acquisition de matériel radar satellitaire (les **images ERS1** vont être prochainement disponibles sur Sumatra) devrait permettre de réaliser la cartographie totale de la Grande Faille de Sumatra, en particulier dans les zones où l'on n'arrive pas à obtenir des images SPOT à cause de la couverture nuageuse. Cette cartographie permettra de préciser la segmentation de ce système de faille, notamment dans la région septentrionale de Sumatra. A cette occasion, on devra aussi essayer de déterminer s'il existe des connexions entre certains segments; ces éventuelles connexions augmenteraient les longueurs des ruptures sismiques potentielles.

- En ce qui concerne la **géodésie**, il est essentiel de pouvoir **remesurer les points terrestres et GPS** mesurés en 1991. En effet seule cette remesure permettra de détecter d'éventuels déplacements "instantanés" (cisaillement intersismique distribué et/ou "creep"). Cette intervention nécessite impérativement une mission qu'il serait souhaitable de pouvoir organiser pendant l'année 1995.

Enfin, une fois terminée l'analyse des données des réseaux sismologiques permanents indonésiens, il serait nécessaire d'installer un **réseau sismologique temporaire** dans une région de la Grande Faille de Sumatra (Padang-Singkarak). Ce choix est guidé par trois raisons scientifiques et logistiques : présence de sismicité historique, de microsismicité instrumentale, et excellent réseau routier. Ce réseau pourrait être installé pendant la saison sèche 1994.