

Dynamitage Sous-marin – Canal de Panama

40^e Session d'Études SEEQ

16 -17 Nov. 2017

Marc-Antoine Prince, ing. Jr.
mprince@maxam.net



Agenda

- ✗ Introduction
- ✗ Contraintes principales du projet
- ✗ Explosifs & Accessoires
- ✗ Équipements
- ✗ Dynamitage Sous-marin
- ✗ Fragmentation & Résultats post-sautage
- ✗ Vibrations Sismiques



Introduction

Dynamitage Marin – Canal Panama

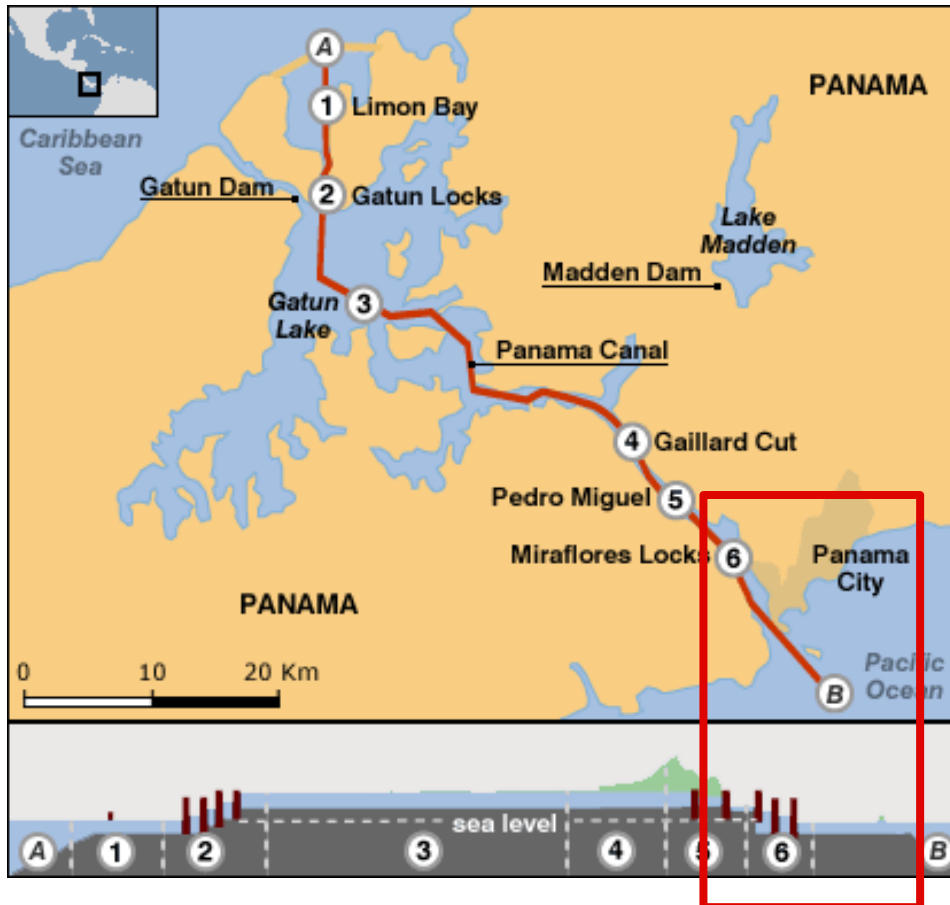




CANAL DE PANAMÁ



Introduction



Longueur totale du Canal

- 77 km

Temps de traversée

- 8-10 hrs

- ✗ Un des plus gros et plus difficiles projets d'ingénierie entrepris dans l'aire moderne;
- ✗ Presque **100 ans** après son inauguration, un projet d'expansion est entrepris afin d'augmenter la capacité du canal



Introduction – Projet d'Expansion

Le projet d'expansion consistait en l'élargissement du canal à l'entrée sud (Pacifique) à un minimum de 225 mètres et à un approfondissement jusqu'à 20 mètres sous le niveau des eaux par région, ainsi que la construction partielle de l'accès Sud des écluses "Cocoli". MAXAM était contracté par *Dredging International Panama* en tant que responsable de fournir les explosifs et de leur application.



Nb de sautages

144

Explosifs total pompés

1.3 million kg.

Durée d'exécution

< 6 mois

Volume total

800,000 m³



CANAL DE PANAMÁ

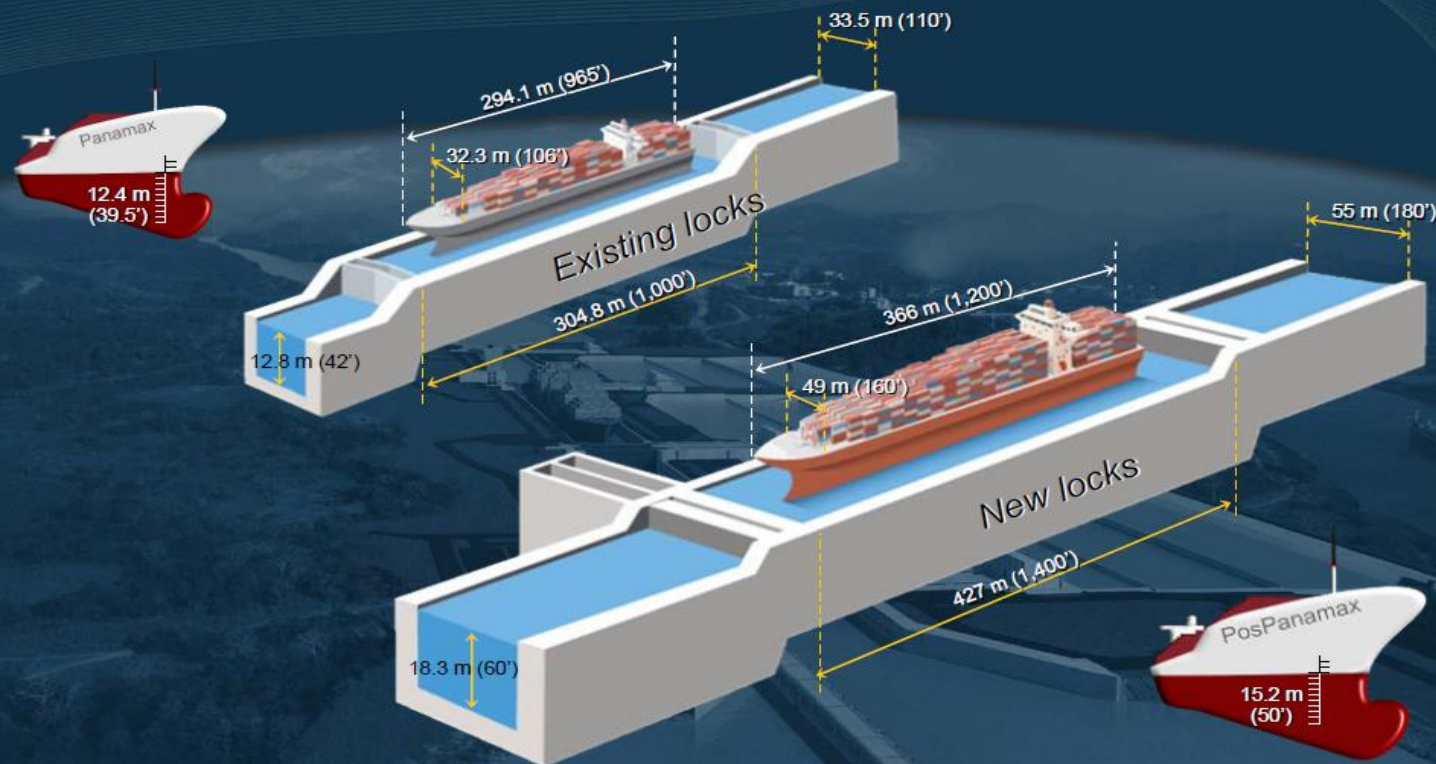


Introduction – Projet d'Expansion

Locks and vessels sizes

Existing locks' maximum vessel size:

4,400 TEU



New locks' maximum vessel size:

12,600 TEU

Contraintes Principales du Projet

Contraintes Principales



Figure . Emplacements des sismographes dans la communauté de Diablo

1. **Niveau de productivité élevé** requis, de part l'échéancier serré du projet;
2. **Explosifs résistant à l'eau** et performant adéquatement sous de **hautes pressions hydrostatiques et dynamiques**;
3. **Vibrations sismiques** doivent respecter les niveaux autorisés (proximité des communautés/villages);
4. Résultats granulométriques des sautages (95%) doivent être au maximum **300mm de diamètre** (Drague à désagrégateur).

Explosifs & Accessoires



Explosif en Vrac

La **RIOFLEX® 1000** est un explosive de type “bouillies” (Waternel).

L’avantage principal et le plus important est que la base du produit **RIOFLEX® 1000** est une matrice oxydante, permettant un transport simplifié (classe 5.1) à moindres risques.

Cet explosive en vrac est un agent de sautage classifié 1.5D et ses caractéristiques principales sont:

- ✗ Vitesse de détonation élevée (~ 7000 m/s)
- ✗ Excellente résistance à l’eau
- ✗ Excellente résistance à la friction et impacts
- ✗ Excellentes caractéristiques de sécurité
- ✗ Grande viscosité



RIOFLEX

Accessoires de Sautage



RIOBOOSTER



RIOLINE



RIONEL

Équipements



CANAL DE PANAMÁ

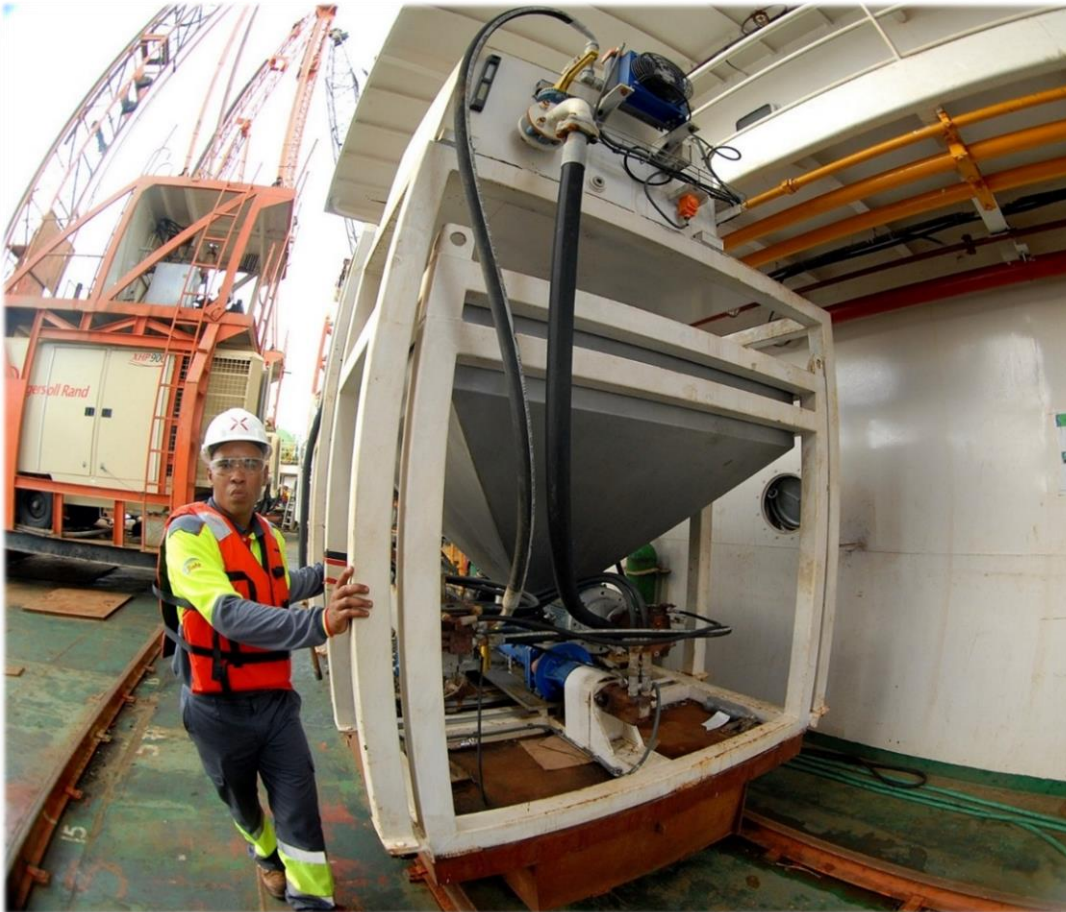


Plate-forme de Forage



- ✗ Plus grosse plate-forme de forage **au monde**;
- ✗ Auto-propulsée et équipée de **10 foreuses hydrauliques** (top hammer) montées sur des structures mobiles et inclinables;
- ✗ **Six points d'encrages** afin d'éviter tout mouvement de la plate-forme durant les opérations de forage.

Cassette – “Mobile Sensitizing Unit” (MSU)



Nombre total de Cassettes

- 3

Capacité de Chargement

- 1,500kg

✗ **Matrice Oxidante, Additifs, Sensibilisants & Solution de Gélification** sont mélangés directement dans la Cassette

Figure . Déplacement d'une Cassette sur le système de rail



CANAL DE PANAMÁ



Bâteaux Auxiliaires



Figure . Barges de transfert d'explosifs (Rioflex)

Dynamitage Sous-marin



Configuration des Paramètres de Sautage

Patron de forage

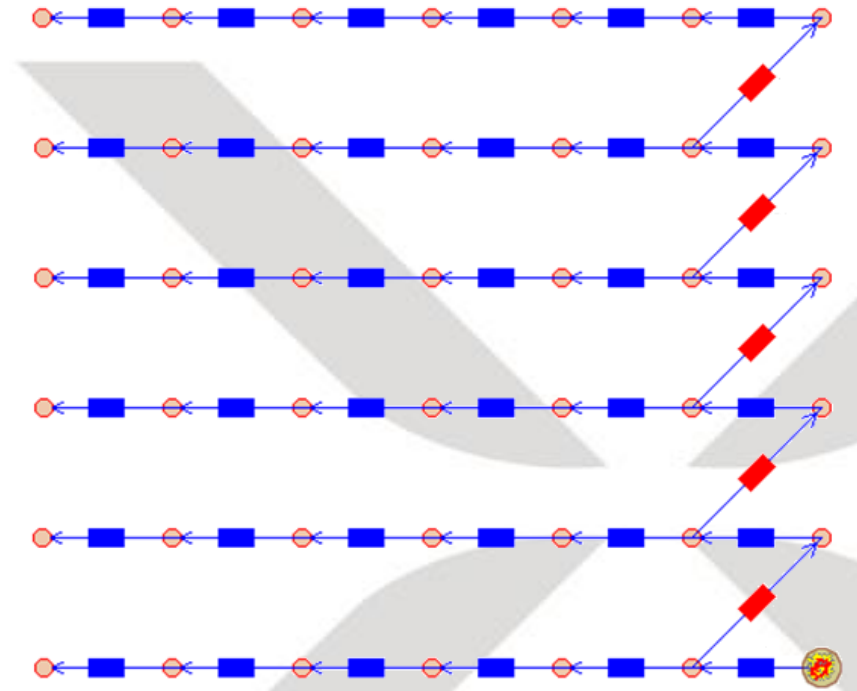
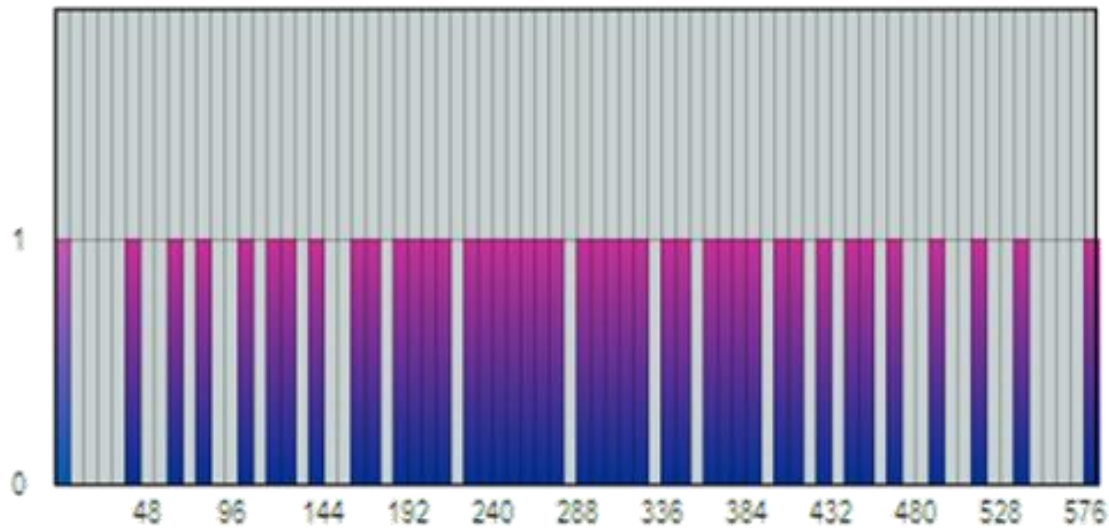
	Minimum	Maximum
Fardeau	21.5 D	25.7 D
Espacement	21.5 D	30 D
Collet	0	10.7 D

*Table . Gamme de valeurs pour la configuration du patron de forage
(D=140mm ou 5.5 po.)*

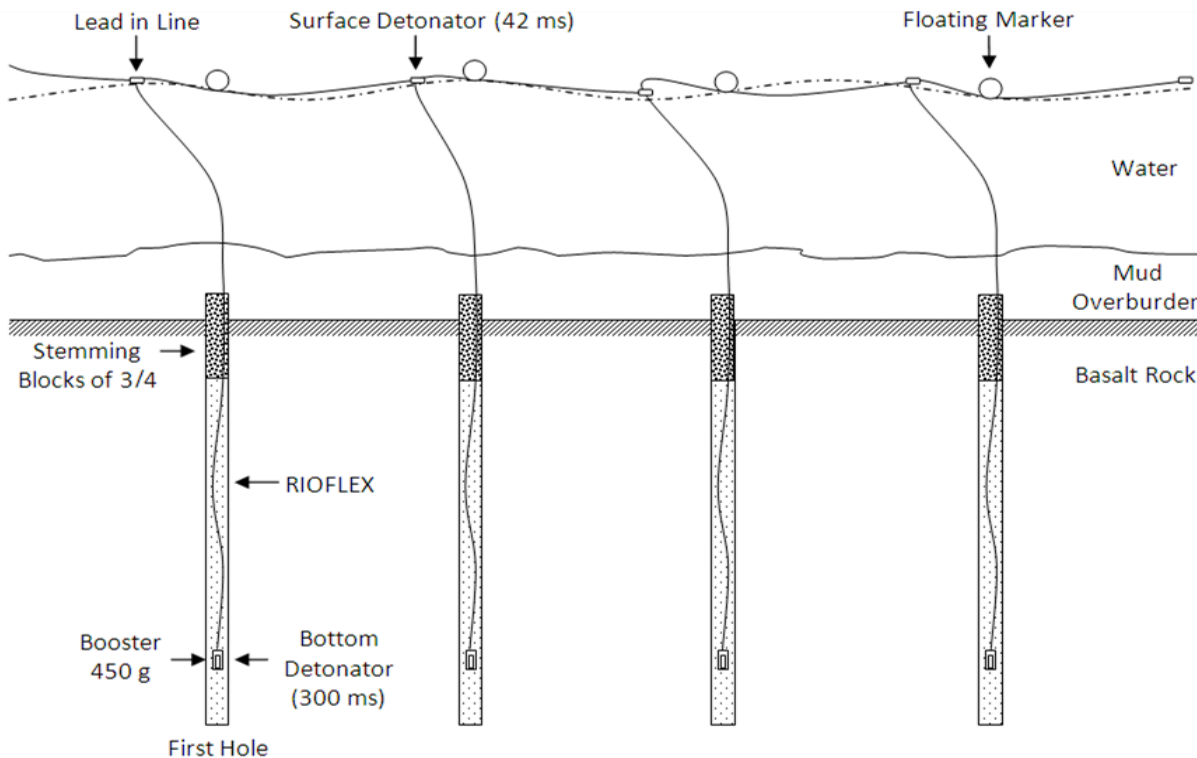
✗ Variation de la mesure de fardeau selon l'épaisseur de boue/mort-terrain par zone.

Configuration des Paramètres de Sautage

Séquence de Tir



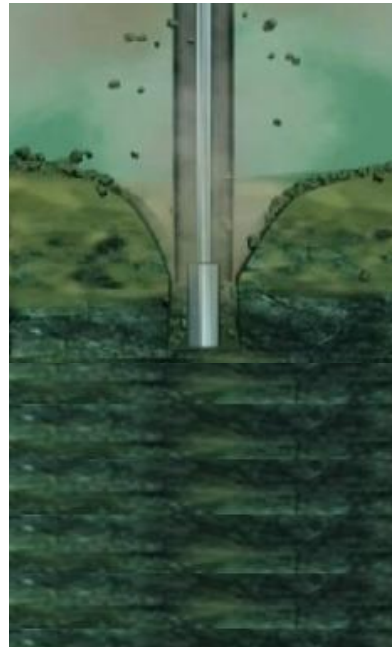
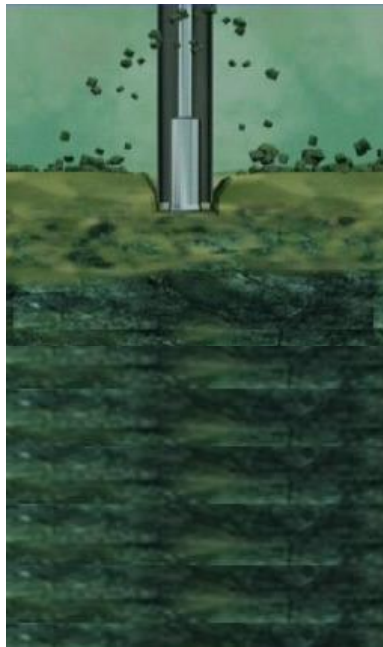
Forage, Amorçage, Chargement & Attachage



1. Installation du « casing » & du tube de forage;
2. Forage du mort-terrain
3. Forage du roc;
4. Rinçage (« flushing »);
5. Amorçage et Chargement des explosifs;
6. Bourrage;
7. Extraction du « casing » et Récupération des connecteurs de surface
8. Connexion des détonateurs

1. Installation du « casing » & du tube de forage;
2. Forage du mort-terrain
3. Forage du roc;
4. Rinçage (« flushing »);
5. Amorçage et Chargement des explosifs;
6. Bourrage;
7. Extraction du « casing » et Récupération des connecteurs de surface
8. Connexion des détonateurs

Forage



**INSTALLATION DU « CASING »
&
FORAGE DU MORT-TERRAIN (BOUE)**

FORAGE DU TROU



CANAL DE PANAMÁ



Forage





CANAL DE PANAMÁ



Forage





CANAL DE PANAMÁ



Amorçage





CANAL DE PANAMÁ



Chargement



Dynamitage Marin – Canal Panama



CANAL DE PANAMÁ



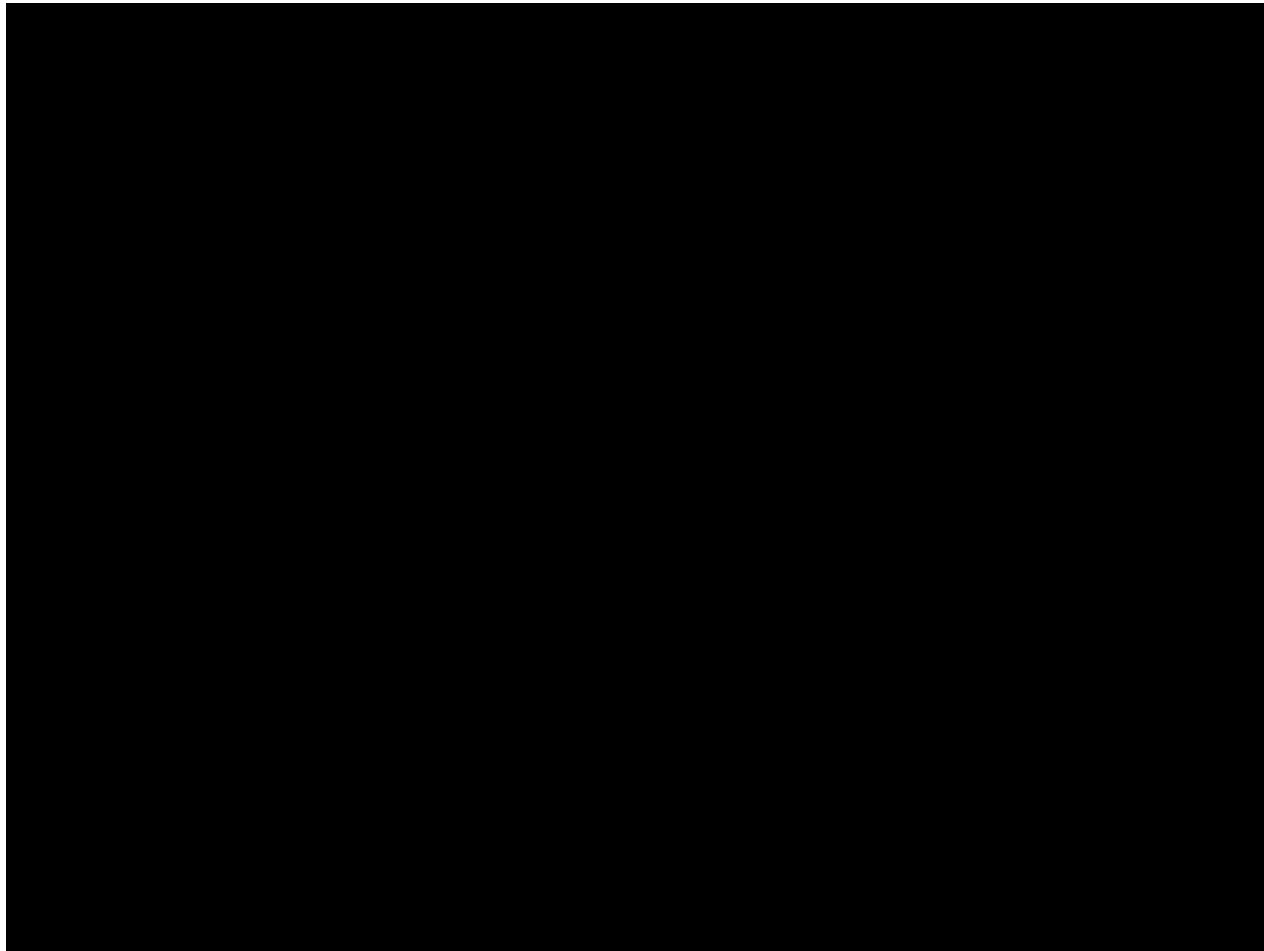
Attachage



Dynamitage Marin – Canal Panama



3, 2, 1... Mise à Feu!



Fragmentation & Résultats Post-Sautage



CANAL DE PANAMÁ



Analyses de Fragmentation



Figure . Échantillonnage Post-sautage





CANAL DE PANAMÁ



Analyses de Fragmentation

Les analyses de fragmentation étaient effectuées de 2 façons:

- ✗ Modèle Kuz- Ram
- ✗ Caméra Granulométrique

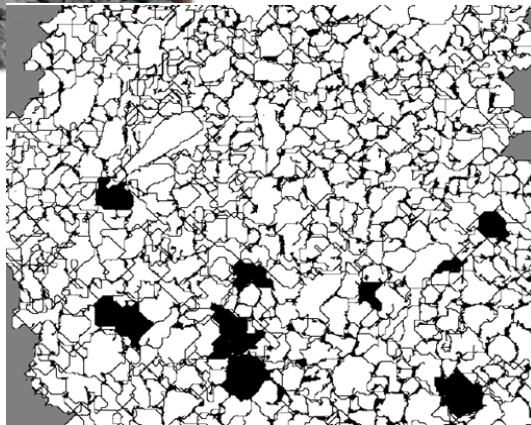


Figure . Résultats d'une Analyse Granulométrique digitale



CANAL DE PANAMÁ



Analyses de Fragmentation

Geomechanic Parameters	Rating	Classification
1. Rock Mass Description (RMD)		
1.1. Powdery/Friable	10	50
1.2. Blocky	20	
1.3. Totally Massive	50	
2. Joint Plane Spacing (JPS)		
2.1. Close (<0,1m)	10	50
2.2. Intermediate (0,1 to 1m)	20	
2.2 Wide (>1m)	50	
3. Joint Plane Orientation (JPO)		
3.1. Horizontal	10	40
3.2. Dip Out of Face	20	
3.3. Strike Normal to Face	30	
3.4. Dip Into Face	40	
4. Specific Gravity influence (SGI)		
Density (t/m3) =	3	25
	SGI =	
5. Ratio of Strength Influence (RSI)		
SC (MPa) =	280	14
	RSI =	

Selon *Lilly (1986)*, le “**Blastability Index**” (BI) peut être calculé selon l’équation suivante:

$$BI = 0.5 \times (RMD + JPS + JPO + SGI + RSI)$$

BI = 89.5



Selon plusieurs analyses effectuées en Australie par MAXAM, il a été conclue que le “**Rock Factor**” du modèle de *Kuz-Ram* peut être obtenu simplement en multipliant BI par 0.12

Donc, le Rock Factor (A):

A = 10.74



CANAL DE PANAMÁ



Analyses de Fragmentation

De part les paramètres de sautage il est possible de calculer l'**Index d'Uniformité (n)** de *Cunningham* en utilisant l'équation suivante:

$$n = \left(2,2 - 14 \frac{B}{D} \right) \left(\frac{1}{2} + \frac{S}{2B} \right)^{\frac{1}{2}} \left(1 - \frac{W}{B} \right) \left(\frac{L}{H} \right) = 1.46$$

Où: B = Fardeau, D = diamètre de trou, S = espacement, H = hauteur de banc, W = déviation de forage, L = longueur de charge, n = index d'uniformité

Paramètres de Sautage

Taux de Chargement	0,83 kg/m ³ (0.052 lb/pi ³)
Profondeur de trou	4,6 m (15.09 pi)
Diamètre de trou	140mm (5.5po)
Collet	0,96 m (3.15pi)
Charge par trou	46,7 kg (102.96 lb)
Patron	3,5 m x 3,5 m (11.5pi x 11.5pi)

Fragmentation moyenne (X₅₀), Kuznetsov (1973):

$$X_{50} = A * \frac{Q^{1/6}}{K^{0.8}} \left(\frac{115}{REE} \right)^{0.633} = 200.5\text{mm} = 7.89\text{po}$$

Où: A = Rock Factor, Q = masse totale d'explosif (kg), K = Taux de Chargement (kg/m³), REE = Énergie efficace relative



Analyses de Fragmentation

Average Digital Photo Analysis		Kuz-Ram Model	
Particle Size (mm)	Accumulated Passing (%)	Particle Size (mm)	Accumulated Passing (%)
3000	100,0	3000	100,0
2500	100,0	2500	100,0
2000	100,0	2000	100,0
1750	100,0	1750	100,0
1500	100,0	1500	100,0
1250	100,0	1250	100,0
1000	100,0	1000	99,9
750	98,2	750	99,2
500	92,4	500	92,9
400	86,1	400	85,1
300	71,3	300	71,4
250	60,3	250	61,6
125	28,0	125	29,3
88	18,1	88	18,8
63	11,7	63	12,0
31	4,6	31	4,4
16	1,9	16	1,7
7,8	0,7	7,8	0,6
5,5	0,4	5,5	0,4
0	0,0	0	0,0
X50	215,61 mm	X50	200,50 mm
X80	367,69 mm	X80	356,04 mm

Avec toutes les variables obtenues il est maintenant possible de développer la courbe granulométrique en utilisant l'équation de *Rossin-Rammlers*:

$$\% \text{ Passant} = 100 \times \left(1 - e^{-0,693 \left(\frac{X}{X_{50}} \right)^n} \right)$$

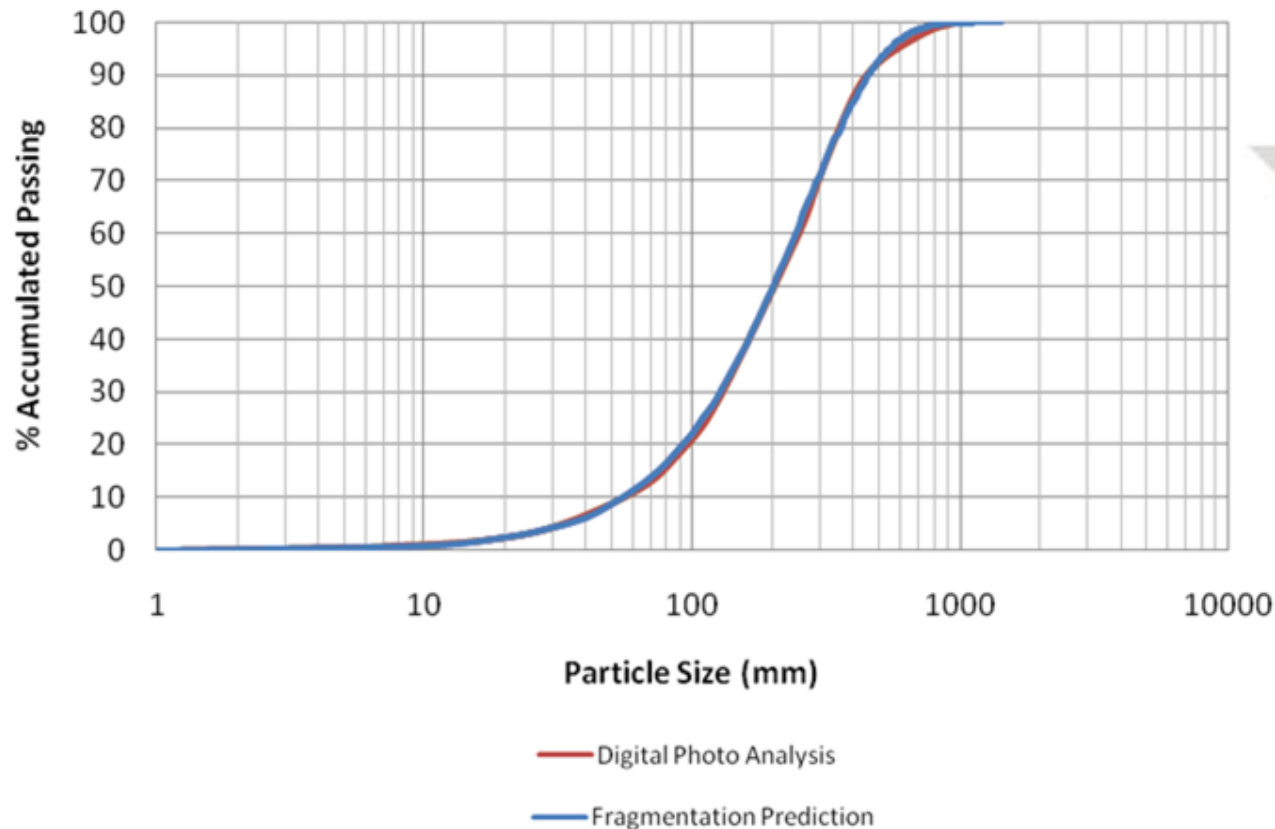
Où: X = taille de tamis, X_{50} = fragmentation moyenne,
 n = index d'uniformité



CANAL DE PANAMÁ



Analyses de Fragmentation



Le modèle de prédiction de fragmentation avec ces conditions spécifiques était satisfaisant, présentant un coefficient de corrélation de 1.03 pour 80% passant avec les 2 types d'analyses (modèle Kuz-Ram et analyse photo digital)

Analyses de Fragmentation



Figure . Dragage à Désagréateur (Vlaanderen XIX)

Vibrations Sismiques

Localisations des Sismographes



Les sismographes étaient installés dans la communauté de Diablo, à proximité des structures les plus propices à ressentir les secousses sismiques induites des sautages sous-marins dans l'entrée Sud du Canal de Panama.

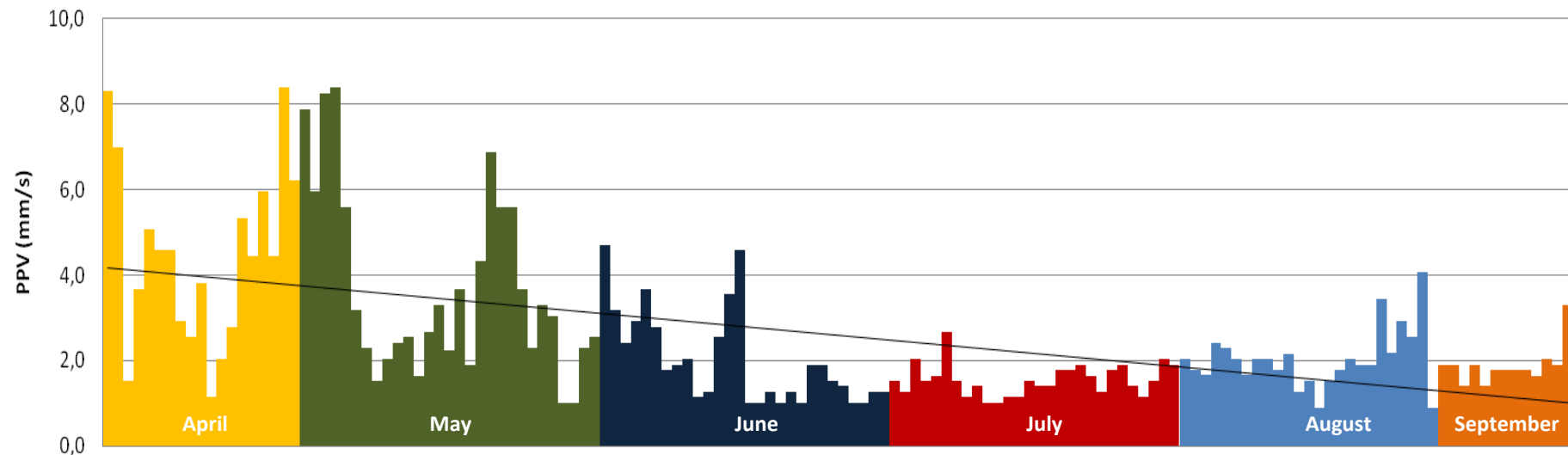
Figure . Localisation des sismographes dans la communauté de Diablo



CANAL DE PANAMÁ



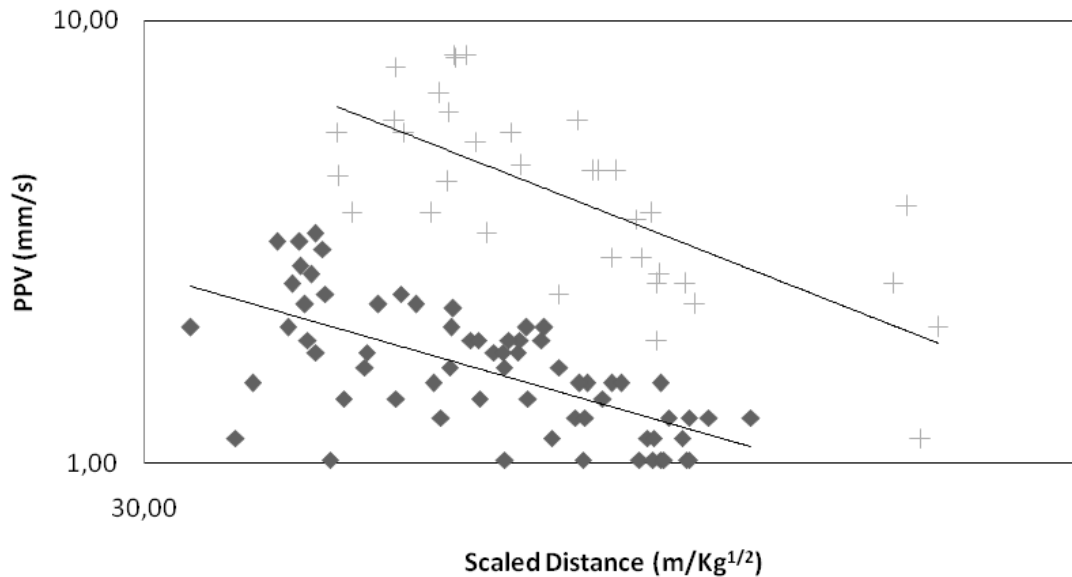
Résultats Sismiques



Graph . PPV enregistrés tout au long des activités de dynamitage sous-marin

Les valeurs maximales de vitesse des particules (PPV) n'ont jamais dépassées les limites USBM RI8507 et OSMRE. Même avec une charge maximale par délai de 281kg (619.5lb) d'explosif, une vitesse maximale des particules de 2.54mm/sec (0.1po/sec) a été atteinte à une distance de 550m (1804.5pi).

Résultats Sismiques



Une des difficultés principales du dynamitage sous-marin est de ne pas pouvoir observer les différentes structures géologiques, tel que les fractures naturelles, discontinuité du massif rocheux, changement de type et propriétés rocheuses, etc. De plus, les valeurs de PPV changeaient selon les conditions de chaque zone dynamitée.

Ces faits ont rendus la prédiction des PPV très difficile tout au long du projet et suite à la complétion des opérations de dynamitage, 2 tendances se sont formées dû à la complexité géologiques du Canal de Panama.



CANAL DE PANAMÁ



Résultats Sismiques

Un autre phénomène observé, tout au long du projet de dynamitage, était la manifestation de basses fréquences. De multiples essais ont été faits afin d'observer le manque ou la faible utilisation de bourrage et, comme il est possible de l'observer sur les graphiques ci-dessous, l'amplitude de mouvement des particules sur l'axe transversal est accentuée.

