Nuevo DNA Blast software,
(…y se puede diseñar una secuencia diez veces mas rápidamente)

Dr. Thierry BERNARD,
Thierry Bernard Technologies, Francia

Resumen

Quien ha experimentado una sola vez en su vida el diseño de una secuencia de disparo, sabe lo que eso significa como desafió. Se ponga todavía peor ahora con las normas ambientales que vienen combinarse con las limitaciones y reglas técnicas y operacionales tradicionales. En este contexto, diseñar una secuencia que permite un buen nivel de fragmentación, una forma perfecta del muckpile, un control óptimo de las vibraciones, sin ocasionar ningunos daños o fly rocks, puede ser bastante difícil de lograr a primer paso. Por supuesto combinando experiencia e intuición con algunas ecuaciones, probando cada una de las opciones con ensayo y error, se puede definir, al final, una serie de tiempos adaptados.

Sin embargo sabíamos que cambia el contexto de una tronadura en forma constante. De eso resulta la obligación de ajustar, también en forma constante, los parámetros para mantener la secuencia optimizada.

Esta conferencia va a presentar el resultado de 15 años de investigación, tanto en explosivos como en los mecanismos de fragmentación de la roca, con fin de desarrollar una herramienta que permite de facilitar la creación de una secuencia en el contexto antes descrito.

La tecnología “DNA Blast” considera de manera independiente cada uno de los elementos que, juntos, constituyen el resultado de una tronadura. Dependiendo de como, y en que proporción se combinan dichos llamados « genes », dan resultados distintos por una misma tronadura, tal como, en la naturaleza, cada criatura o especie salen de una combinación original de genes distintos.

La identificación de dichos genes y la comprensión de sus interacciones potenciales han permitido la creación de un software que puede calcular la totalidad de los parámetros necesarios a la realización de la tronadura tal como espectada, y en solamente cinco clic.

¿Pueden creerlo?

El mecanismo de rotura de la roca mediante explosivos

Un mecanismo bien conocido

Del mecanismo general de fragmentación de la roca mediante explosivos no se queda ningún secreto para los especialistas del mundo. Este proceso sigue el siguiente encadenamiento: disgregación de las sustancias explosivos en gases de alta presión y alta temperatura / propagación de las ondas de tensión en el macizo rocoso / rotura y daño de la roca / expansión de los gases hacia las zonas de fragilidad recientemente creadas / apertura franca de las fracturas, y, por fin, puesta en movimiento y eyección de los fragmentos de material.

A continuación recordamos en forma rápida cada una de las fases de este proceso, con fin de autorizar un mejor entendimiento del fenómeno global.

Disgregación de las sustancias explosivos, campo de presión

Al detonar, la sustancia explosiva va disgregarse en gases de alta presión y alta temperatura. Frecuentemente se habla de « presión de detonación », tal como si estuviera un tipo único de presión al momento de la detonación, o si el fenómeno estuviera estático, comparable a lo que se puede encontrar al interior de una olla a presión, al cocinar papas.

En la realidad, se trata de un campo de presión; eso es decir una presión dependiente del tiempo. Esta presión se aplica sobre la pared del pozo hasta que se deforme, o que fracturas se formen a sus alrededores.

Campo de presión, ondas de tensión

La presencia de un campo de presión sobre la pared del pozo provoca la aparición de un campo de tensión en la roca. La característica dinámica de la fuente de este campo de tensión (detonación del explosivo) ocasiona la propagación de una onda de tensión en el macizo rocoso. Dicha onda es del tipo P (compresión). Sigue inmediatamente una onda de tipo S, al momento de atravesar zonas no homogéneas.

Rotura o daño

La onda de tensión empieza su vida sobre la pared del pozo con una amplitud igual a la presión máxima de detonación (llamada a veces « presión de choque »). Dicha amplitud se encuentra frecuentemente bastante superior a la resistencia a compresión de la roca. Eso conduce la onda de presión a completamente destruir la matriz rocosa, mientras que su amplitud se quede efectivamente, y estrictamente, superior a la resistencia a compresión de la roca.

Más allá de este punto, la onda de compresión sigue su camino, dañando la roca. El daño puede describirse como un estado de debilidad de la roca consecutivamente a una solicitación para una fuerte tensión.

A esta altura es útil recordarse que una onda, por su naturaleza propia, tiene un efecto oscilatorio. Es decir que atrás del frente de onda de compresión, va encontrarse, a una distancia igual a la mitad de una longitud de onda, una zona con una amplitud negativa (oscilación de la materia).

Esta zona tiene el potencial de romper la materia si su amplitud esta superior a la resistencia a tracción de la roca, o de dañarla si tiene una amplitud fuerte comparativamente a la resistencia a tracción. Se nota que este principio físico, después de la reflexión de la onda de tracción contra una cara libre, participe en primer lugar a la rotura de la roca (cara). Al reflejarse, la onda cambia de signo y, de compresión, se convierte entonces en tracción.

Tomando en cuenta la baja resistencia a tracción de la roca (alrededor de 20 veces menos) comparativamente a su resistencia a compresión, al reflejarse contra la cara, tiene todavía una fuerte amplitud. Al regresar como onda de tracción, tiene un efecto devastador.

La onda S, que sigue la onda P, hace un trabajo similar solicitando la materia por cizallamiento; dicha materia que , todavía, ha sido debilitado para la onda P.

Expansión de los gases y fragmentos de roca

Los gases en presión adentro del pozo tienen ahora la posibilidad expandirse a través de las zonas fragilizadas o destruidas por ondas, penetrando en las microfracturas, ampliando las fracturas mayores y desagregando al final la matriz rocosa en una multitud de fragmentos.

Puesta en movimiento de los fragmentos

La presión de los gases que se expanden viene aplicarse contra la pared de los fragmentos de roca. Resulta de eso un campo de fuerza sobre cada fragmento, cuales tienden a adquirir una aceleración, basándose en la ley fundamental de dinámica.

Su trayectoria esta dictada por la ley de gravedad y se encuentra bastante comparable a la curva balística de una bala de cañón.

Modelo DNA Blast, el principio

El modelo DNA Blast esta copiado al principio del ADN de un organismo vivo. El ADN esta una combinación única de genes propia a este organismo (cada uno de dichos genes describiendo una funcionalidad elemental del organismo).

Este principio ha sido aplicado a las tronaduras, considerando cada tronadura como un « ser » único, producto de la combinación de los efectos elementales de un ensamblaje único de « genes ».

Mecanismos elementales (genes)

El mecanismo antes descrito puede descomponerse en distintos módulos elementales, interaccionando entre ellos. Un modulo representa una acción especifica, basándose a un principio físico, y incluye elementos de entrada y salida.

El modulo balístico puede servir de ejemplo para el principio:

- El describe la trayectoria de un fragmento
- Principio físico : principio fundamental de dinámica aplicado a un fragmento de roca

- Elemento de entrada : campo de presión aplicándose sobre la pared de un fragmento de roca
- Elemento de salida : trayectoria de un fragmento de roca
- Este tipo de modulo esta llamado : « gen »

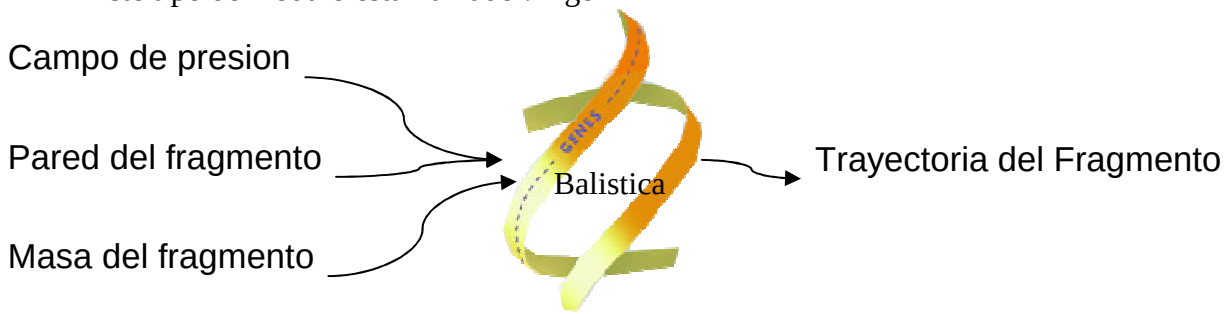


Figura 1 : Ejemplo del « gen Balistico »

Modelización de los genes y de los genes « inversos »

Cada gen se funda sobre un modelo matemático que vincula los datos de salida a los datos de entrada. El gen « inverso » es un modelo que vincula los datos de entrada a los datos de salida. Esta función por supuesto no existe en la naturaleza y esta un puro artefacto matemático.

Puesta en relación de los genes entre ellos (interacciones múltiples)

Cada gen codifica una acción particular del mecanismo de fragmentación. Algunos genes tienen varias entradas por una sala salida. Por otra parte hay que notar que la acción de cada gen no esta independiente al estar vinculado al parámetro tiempo. En efecto, cada acción posee su propia cinética. De eso resulta entonces una red de genes con vínculos cruzados, edificando una red del tipo « neuronal », ajustado por tiempo (ver mas abajo la lista de los genes seleccionados).

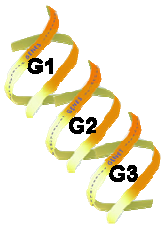


Figura 2 : Ensamblaje tipo de genes – Hélice ADN

Resolución del problema directo (simulación)

La resolución del problema directo permite simular los efectos de la explosión de cargas explosivas en la materia (modelización del efecto cada uno de los genes a partir de sus elementos de entrada, tomando en cuenta las interacciones que tienen entre ellos).

Entre estos efectos vamos a seleccionar la fragmentación de las rocas (distribución granulométrica), la trayectoria de los fragmentos de rocas (forma del muckpile o proyecciones), las vibraciones generadas alrededor de las cargas, el daño al macizo rocoso en los alrededores de la tronadura (macizo rocoso que se queda).

Resolución del problema inverso (optimización)

La resolución del problema inverso permite determinar los parámetros de empleo de una carga explosiva necesarios para alcanzar el efecto deseado (modelización del efecto inverso de cada uno de los genes a partir de sus elementos de salida, tomando en cuenta las interacciones que tienen entre ellos).

Entre estos efectos vamos a seleccionar la fragmentación de las rocas (distribución granulométrica), la trayectoria de los fragmentos de las rocas (forma del muckpile o proyecciones), las vibraciones generadas alrededor de las cagas, y el daño al macizo rocoso en los alrededores de la tronadura (macizo rocoso que se queda).

Los genes seleccionados

A esa altura del desarrollo, una veintena de genes ha sido seleccionada con fin de asegurar una modelización consistente del mecanismo de fragmentación. Abajo figura una representación esquemática de las interacciones entre dichos genes.

En la izquierda se encontrara la lista de los parámetros de entrada del modelo. A la derecha son los « genes de salida » que describen los cincos mayores efectos de una tronadura: la fragmentación, la forma del muckpile, las vibraciones, las proyecciones, y el daño al macizo rocoso.

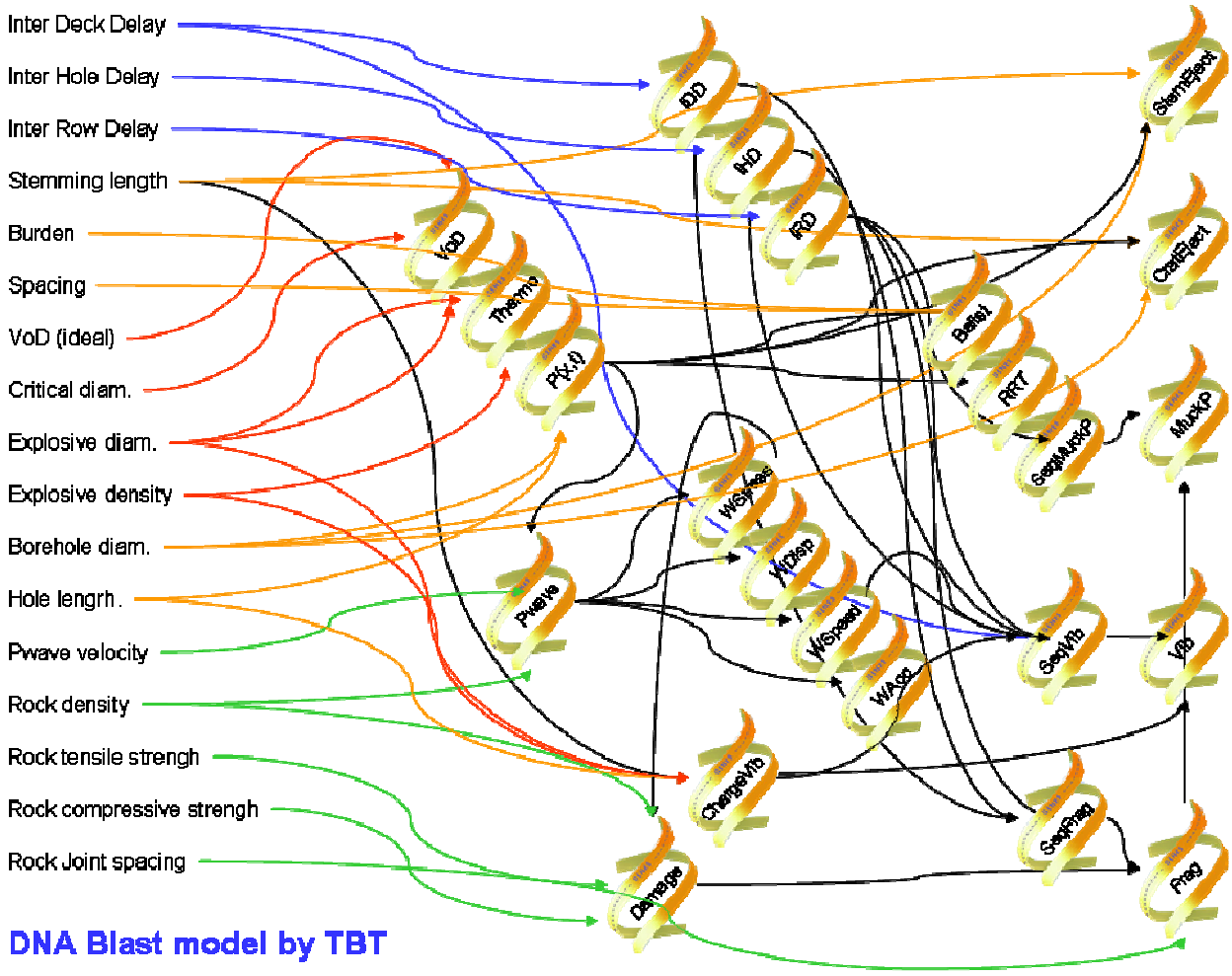


Figura 3 : Esquema de las interacciones entre los genes del modelo DNA Blast

El software X-Blast: una aplicación concreta

X-Blast es un software que permite manipular de manera amigable los genes ya descritos.

Este sistema permite efectuar o simulaciones (previsión de los efectos de una tronadura a partir de los parámetros de realización de dicha tronadura) o la optimización de los parámetros necesarios a la realización de la tronadura a partir de los objetivos deseados.

Esta es la parte más fascinante por corresponder exactamente a la espera de cualquier persona que debe diseñar una secuencia: determinar cuantitativamente los parámetros de implementación del explosivo para lograr los objetivos deseados.

¿Como X-Blast puede lograr tal resultado?

X-Blast, en su parte optimización, empieza por catalogar los objetivos de la tronadura proyectada.

Dichos objetivos son distribuidos en cinco categorías:

- Fragmentación
- Forma del Muckpile
- Vibraciones
- Proyecciones
- Daño al macizo rocoso

Pues X-Blast busca el valor de los parámetros de entrada, utilizando el proceso de simulación inversa, basándose a los genes inversos.

Los siguientes valores de parámetros pueden obtenerse:

- Diámetro del pozo
- Carga del pozo (tipo de explosivo, desacoplamiento, cantidad)
- Altura del taco final
- Sobreperforación
- Espaciamiento
- Altura del banco
- Retardo entre cargas
- Retardo entre pozos
- Retardo entre filas

Por otra parte, se desarrolla cuidadosamente la interfaz del software para hacerla lo mas amigable posible al usuario.

La validez de X-Blast

Con el fin de asegurar la validez del modelo, cada uno de los genes en X-Blast fue validado, comparando sus resultados a medidas obtenidos en terreno o en laboratorio.

Un gen ha sido considerado como válido cuando el desvió porcentual entre los valores simuladas y las medidas en terreno queda inferior a un 30%.

La tabla anexada presenta extractos de dichos resultados de validación cotejando resultados simulados con resultados extraídos de publicaciones profesionales de reputación internacional.

Tomando en cuenta el desvió máximo tolerado de 30%, el modelo X-Blast se encuentra ahora homogéneo y consistente.

X-Blast lite

X-Blast lite es un ejemplo de la amigabilidad de la tecnología DNA-Blast al usuario. Esta versión del software permite calcular la mejor secuencia de iniciación (retardo entre cargas de un mismo pozo, entre pozos, entre filas) para contribuir a lograr el resultado definido.

Se habla de contribución porque la secuencia de disparo no esta el único parámetro que concurre al resultado de una tronadura, aunque su influencia sea decisiva cuando los parámetros claves son elegidos (banco, espaciamiento, carga especifica, carga unitaria, taco,…)

Capturas de pantalla de X-Blast lite:

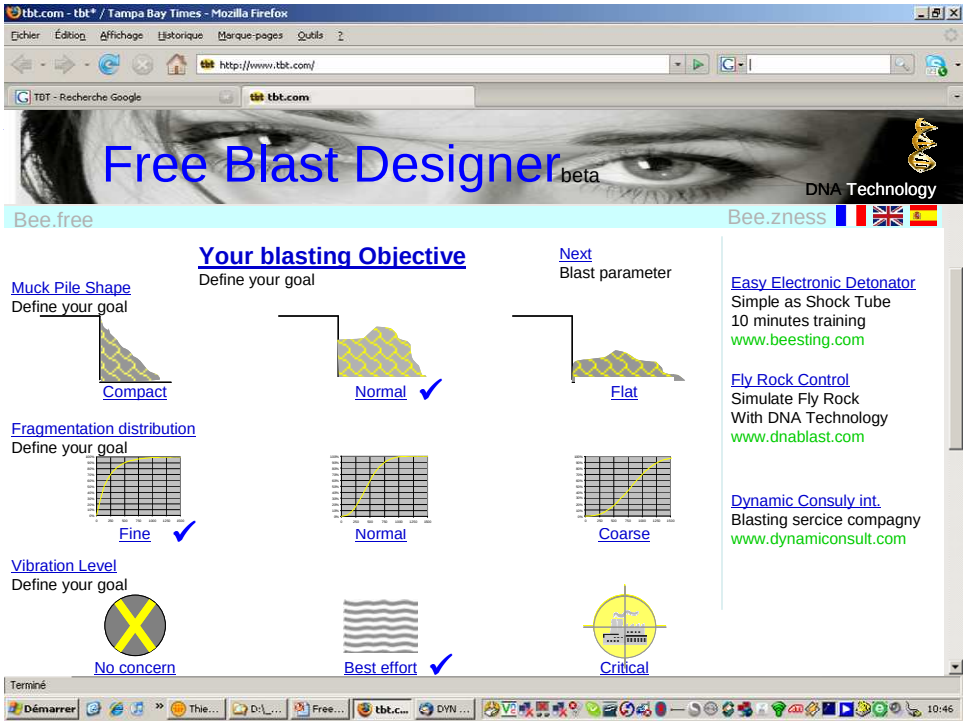


Figura 4 : X-Blast Lite – Interfaz para seleccionar los Objetivos de la tronadura

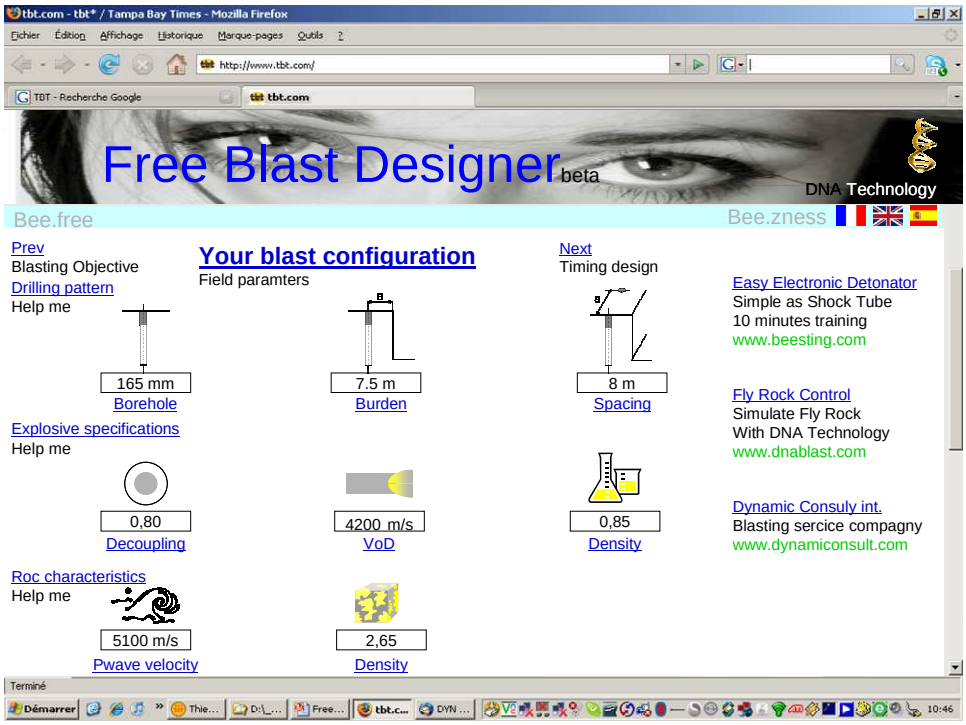


Figura 5 : X-Blast Lite – Interfaz para entrar los Objetivos de la tronadura

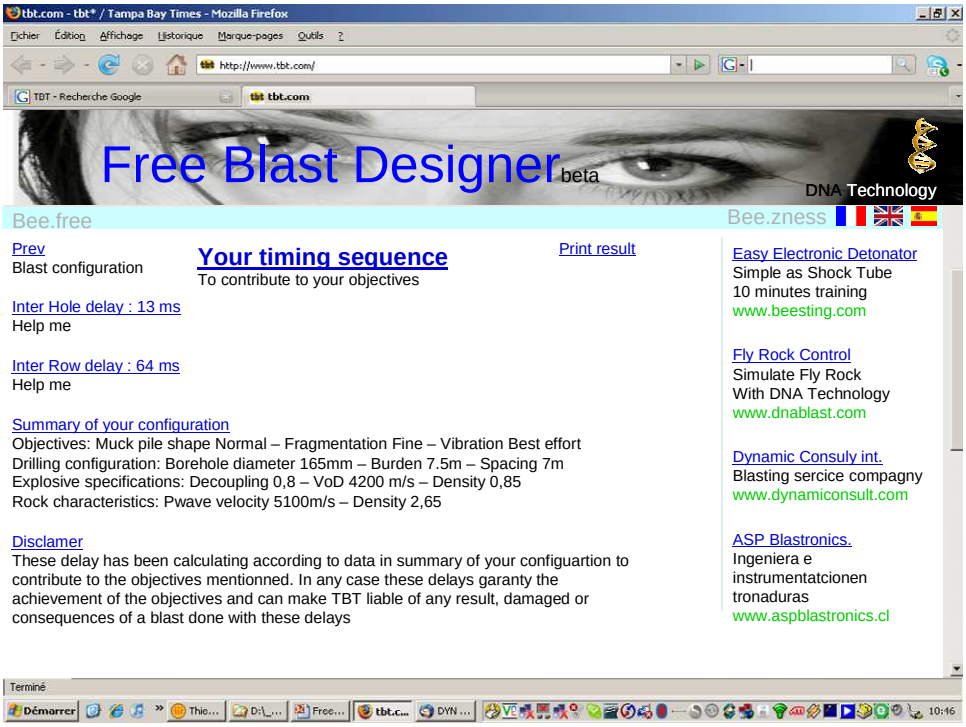


Figura 6 : X-Blast Lite – Ejemplo de un resultado final con una secuencia optimizada

Conclusión

La tecnología DNA Blast permite acercarse al concepto de modelización de una tronadura, descomponiendo el mecanismo global de facturación de las rocas en una suma de mecanismos elementares, llamados genes. Cada uno de los genes modelizado se funda a un principio físico

y es validado frente a medidas en terreno o en laboratorio. El modelo global resulta muy homogéneo y permite una modelización confiable del mecanismo.

Además, los genes pueden estar invertidos para calcular sus parámetros de entrada en función del resultado deseado.

Esta característica, que no tiene existencia fuera del ámbito matemático, abre una ruta hacia una optimización de las tronaduras a partir de la expresión de sus objetivos. El ejemplo de X-Blast lite demuestra como se pueden determinar muy amigablemente los tiempos de disparo de cargas explosivos para contribuir a lograr los objetivos deseados.

Al momento de escribir estas líneas, el modelo completo, llamado X-Blast Standard, esta por terminarse. Cada uno va, entonces, estar, pronto, en posición de experimentar, tanto su potencia como su facilidad de uso.

Anexo 1 – Lista de los genes modelizados

- G10-Gen VOD: determina la velocidad de detonación de un producto explosivo en función de su diámetro
- G11-Gen Thermo: determina la presión de detonación para un explosivo de un diámetro conocido
- G12-Gen P(x,t): determina el campo de presión que se aplica sobre la pared del pozo en función del explosivo utilizado y del desacoplamiento
- G20-Gen WaveP: determina las condiciones de propagación de una onda P creada para un campo de presión aplicándose sobre la pared de un pozo
- G21-Gen WStress : determina el campo de tensión asociado al campo WaveP
- G21-Gen WDisp : determina el campo de desplazamiento asociado al campo WaveP
- G22-Gen WSpeed : determina el campo de velocidad asociado al campo WaveP
- G23-Gen WAcc : determina el campo de aceleración asociado al campo WaveP
- G30-Gen Damage : determina para un campo de tensión dinámica el estado de daño de la roca
- G31-Gen Frag : determina la distribución granulométrica de la área de roca dañada
- G40-RRT : determina el tiempo de respuesta de una masa de roca sujetado a un campo de presión
- G41-Gen Balist : determina la trayectoria de un fragmento de roca sujetado a un campo de presión
- G41-Gen MuckP : determina la forma de un montón de fragmentos
- G42-Gen StemEject : determina las condiciones de eyección del taco final
- G43-Gen CratEject : determina las condiciones del efecto cráter de una carga localizada cerca de la superficie
- G50-Gen ChargeVib : determina el nivel de vibración en función de la carga unitaria
- G60-Gen SeqVib : determina el nivel de vibración en función de la secuencia de disparo
- G61-Gen SeqFrag : determina la distribución granulométrica en función de la secuencia de disparo
- G62-Gen SeqMuckP : determina la forma del muckpile en función de la secuencia de disparo

- **Anexo 2 – Extracto de los resultados de validación de los principales genes**

Gene	Variable	References	Autor(s)	Extracts of results	Variations
P(x,t)	Detonation pressure	**Emulsion explosive Technology**- 5th High-Tech Seminar on Blasting Technology, Instrumentation and explosives Applications (1994)	David BORG		<10%
	Source of Pression + Thermodynamic of expension of gaz	**EXPLO2D-Etude et développement des aspects thermodynamiques** Compgnie Nouvelle de Scinetifiques, Daniel Dumay (1990)	Daniel DUMAY		
	Detonation pressure	**Fiche technique du Nitrate fioul (N135, NR20, NR10)**	Nobel explosives		
Wspeed	PPV	**Monitoring of large open cut rounds** – Fragblast vol.1 #1 1997	F.OUCHTERLONY S.NIE U.NYBERG J.DENG		<22%
WDisp	PPV	**Holmberg-Persson Constants for Modelling** – Fragblast vol.8 #2 2004	I.ONEDERRA S.ESEN		
	PPV	**Studies On the effect of burden on Blast Damage** - Fragblast vol.6 #2 2002	G.BRENT		
	PPV	**Generation of strain waves in rock by an explosion in a spherical cavity** - Journal of Geophysical Research	R.F FAVREAU		
stemEject	Stemming Ejection Velocity	**The use oh High-Speed motion-picture photography in evaluating blast design** – Une école d'été internationale (Ales 6-10 sept. 1993)	R.F CHIAPETTA		28,00%
	Stemming Ejection Velocity	**Analytical High Speed Photography to evaluate air decks, stemming retention and gas confinement** - 1st Annual High-Tech Seminar – State-of-the-art Blasting Technology Instrumentation and applications (1989)	R.F CHIAPETTA M.HAMMELE		
	Stemming Ejection Velocity	**Stemming selection for large-diameter blastholes**	J.ELORANTA		
RRT	Face Ejection Velocity	**Rockmass response Quantification** – Daveyfire, Inc.- Weaverland Quarry (June 2001)	J.FLOYD		20% / 13%
		Analysis of bench face movement in quarry blasting - Explosives and Blasting Technique, HOLMBERG ed	P.SEGARRA J.A.SANCHIDRIAN J.PASCUAL R.ORTIZ A.GOMEZ		14%
CratEject	Strain Energy Factor	**Rock Blasting & Explosives Engineering** – Chapter 4 : Shock Waves and Detonations, Explosive Performance (p.126)	P-A.PERSSON R.HOLMBERG J.LEE		<15%
	Strain Energy Factor Hauteur bourrage critique	**Rock Blasting & Explosives Engineering** – Chapter 11 : Blast Performance Control (p.313)	P-A.PERSSON R.HOLMBERG J.LEE		<8%
Wtress	Stresses	**Modelamiento Interaccion de Ondas** – Jornadas de Tronadura 29/30 Nov 2001 – Présentation power point de mesures effectuées dans une mine de porphyre	F.VANBRABANT		<25% / <20% / <11% / <10% / <07%

Extracts of results

Test	densité explosif	VOD (m/s)	Diamètre (mm)	Pression calculée (GPa)
75%/25%	1.26	5198	89	11.1
25%/75%	1.15	5168	228	10.0
30%/70%	1.21	4925	171	9.6
40%/60%	1.25	5472	228	12.2
50%/50%	1.3	5320	171	12.0

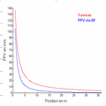
Emulsion/ANFO

Pressions mesurrées toutes dans l'intervalle **10 Gpa-12 Gpa**

Paramètres du Tir :
Diamètre du trou -> 311 mm
Explosif EMULAN : 1.15-1.3 gcc, VOD mesurées 5460-5890
Diamètre charge -> 311 mm
P-Wave speed déduite des mesures : 4850 m/s
Roche granitique -> 60 Gpa,densité de 2.6
Longueur de charge 7.6 m

Comparaison avec mesures à 10, 20 et 35 m

Mesures PPV (mm/s)	Numériques PPV (mm/s)	Ecart
3500	4284	22 %
~1250	1491	19 %
~550	650	19 %



Distance	Ecart
5 m	66,00%
10 m	66,00%
15 m	70,00%

On est environ **20 % au dessus des mesures** et **66 % en dessous du modèle de Favreau**

On est **plus précis** que le modèle de Favreau sur les valeurs des PPV

Paramètres du Tir :
Explosif WaterGel, Relative Bulk Strength=[159;217]
Densité Explosif=1.18, VOD=3500 m/s
Diamètre de la charge (confiné)=15 in=381 mm
Hauteur de bourrage=20 ft=9 mètres
Pchoc calculé via la routine Pchoc : Pchoc=4.7 GPa

Temps de sortie mesuré	Temps de sortie calculé	Ecart	Vitesse d'éjection mesurée	Vitesse d'éjection calculée	Ecart
43 ms	31 ms	28 %	267 m/s	191 m/s	28 %

Paramètres du Tir :
Longueur de charge : 27.2 ft = 8.27 m
>> Explosif ANFO : VOD idéale = 4000 m/s et diamètre critique de 50 mm
>> Inclinaison du trou : 10 °
>> Diamètre de la charge : 6 1/4 in = 160 mm
>> Densité déduite de l'explosif : 140 kg/ Volume explosif = 842 kg/m³
>> Banquette : 19 ft = 5.8 m
>> Espacement : 18 ft = 5.5 m
>> Matériau : calcaire (2600 kg/m³)

A t=200 ms

Deplacement	
Mesuré = [2,0 ; 2,49] m	
Calculé = 2,9 m	
Ecart = 20 %	

Vitesse	
Mesuré = [10,2 ; 12,5] m/s	
Calculé = 14,1 m/s	
Ecart = 13 %	

>> Longueur de charge : 9.6 m
>> Explosif GOMA 2 ECO : 35 kg , VoD = 6100 m/s
>> Inclinaison du trou : 0 °
>> Diamètre de la charge et du trou : 92 mm
>> Banquette-Espacement : 2.3-3.3 m
>> Bourrage : 2.6 m
>> Densité Roche = 2650 kg/m³

Vitesse éjection mesurée	23,8 m/s
Vitesse éjection calculée	27,1 m/s
Ecart	14,00%

Roche	Explosif	Es mesuré	Es calculé	Ecart
Quartzite (2500 kg/m³)	ANFO (840 kg/m³)	1,35	1,43	8%
Quartzite (2500 kg/m³)	TNT-Slurry (1400 kg/m³)	1,47	1,21	0%
Slate (2700 kg/m³)	ANFO (840 kg/m³)	1,25	1,47	15%
Specularite Quartz (2800 kg/m³)	ANFO (840 kg/m³)	1,71	1,53	11%
Magnetite (5000 kg/m³)	TNT-Slurry (1400 kg/m³)	1,71	1,52	11%

Es : Strain Energy Factor

Vérification : rho_roche=2500 kg/m³
rho_explo=1400 kg/m³ (TNT-SLURRY)

Es mesurée	Es calculée	Ecart	Hauteur mesuree	Hauteur Calculée	Ecart
1,32	1,21	8,00%	2,5 m	2,3 m	

Geophone à 6,5 m du trou
>>Paramètres Entrée : Cp=5900 m/s ; Diametre=140 mm ; charge de 6 m ANFO (VOD = 4000 m/s)

Radiale mesurée	Radiale calculée	Ecart	Orthoradiale mes.	Orthoradiale calc.	Ecart
39 Mpa	44 Mpa	12,00%	13 Mpa	16,5 Mpa	25,00%

Nb : Seul le premier pic de pression est exploitable (cause interférences)

>>Paramètres Entrée : Cp=5900 m/s ; Diametre=140 mm ; charge de 8 m EMULSION (VOD = 5500 m/s)

Radiale mesurée	Radiale calculée	Ecart	Orthoradiale mes.	Orthoradiale calc.	Ecart
90 Mpa	85 Mpa	5,50%	40 Mpa	32 Mpa	20,00%

Verification Régime impulsionnel
(Source de 50 GPa, Vp=3100 m/s, Matériau de densité 2.6 , Module de Young 60 GPa , Poisson=0.25)

Distance source en m	Amplitude en GPa (numérique)	Amplitude en GPa (théorique)
0	55	55
1	3.00	6.88
2	1.00	2.00
3	0.60	0.86
4	0.35	0.44
5	0.24	0.25
6	0.17	0.16
7	0.12	0.11
8	0.09	0.08
9	0.06	0.06

Ecart Max = 11 %

Verification Régime forcé
Fréquence du signal = 125 kHz , nombre d'onde=24.65)
(Source de 50 GPa, Vp=3100 m/s, Matériau de densité 2.6 , Module de Young 60 GPa , Poisson=0.25

Amplitude des pics à un temps T (errata : pas 10^12 mais 10^10 Pa)

$\sigma_r^{num} \times 10^{12}$	5.30	-3.42	2.53	-2.02	1.68	-1.42	1.24	-1.11
$\sigma_r^{th} \times 10^{12}$	4.8	-3.12	2.33	-1.87	1.57	-1.34	1.17	-1.00
Ecart en %	10	9	8	8	7	6	6	10

Position des pics (mètres de la source) au même temps T : Mesure du **déphasage des pics**

Position des pics (num)	0.13	0.21	0.29	0.37	0.45	0.53	0.61	0.69
Position des pics (th)	0.14	0.22	0.31	0.39	0.47	0.55	0.64	0.72
Ecart en %	7	5	6	5	4	4	5	4

1. Principales Referencias

BERNARD T., 1995 - Maîtrise de l'Energie Explosive : Action de l'explosif sur le milieu environnant – tesis sostenida el 16 de octubre 1995 – Institut de Geodynamique URA-CNRS

BROUCHIER F.,- Modèle de la sphère pulsante - www.brouchier.com/livre/

DUMAY D., 1992 - EXPLO2D-Etude et développement des aspects thermodynamiques

CHAPOT P., 1981 - Etude des vibrations provoquées par les explosifs dans les massifs rocheux – Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (1981)
Study of the vibrations caused by the explosives in the rock solid masses

DAEHNKE A., ROSSMANITH H.P., SCHATZ J., 1997 -
On dynamic gas pressure induced fracturing - Fragblast vol.1 #1 1997

EUVRARD D.,- Résolution numérique des équations aux dérivées partielles de la physique, de la mécanique et des sciences de l'ingénieur : Différences finies, éléments finis, problèmes en domaines non bornés.
Numerical resolution of the partial derivative equations of physics, mechanics and engineerings: Finite differences, finite elements, problems in not limited fields

FAVREAU. R.F,
Generation of strain waves in rock by an explosion in a spherical cavity - Journal of Geophysical Research

GARRIGUES J., - Statique des solides élastiques en petites déformations – Ecole supérieure de mécanique de Marseille

HADAMARD J., 1903 - Leçons sur la propagation des ondes
Lessons on the wave propagation

HOLSAPPLE. K.A ,
Notes on Crater Scaling Results

LIARD.J.J., 1993 - Efficacité du bourrage dans le collet des trous de mine – Une école d'été (6-10 setiembre 1993)
Efficiency of the stemming in blast-holes

ONEDERRA I., ESEN S.,
Selection of inter-hole and inter-row timing for surface blasting - an approach based on burden relief analysis

PICANDET V., - Influence d'un endommagement mécanique sur la perméabilité et sur la diffusivité hydrique des bétons (capitulo III -Variable d'endommagement, Evaluation de l'endommagement, Modèles d'endommagement) – Thèse Ecole doctorale de Mécanique, Thermique et Génie Civil de Nantes

PERSSON P-A., HOLMBERG R., LEE J.,
Rock Blasting & Explosives Engineering – Capitulo 11: Blast Performance Control (p.306)

RICCIARDI G., MENCACCI S., - Approche numérique de l'abattage de roches - Sujet de stage , société NITROCHIMIE

ROSSMANITH H.P, Mayo de 2006.
The Mechanics and physics of advanced blasting-waves, shocks, fracture, damage, impact and profit – Short Course FragBlast8

ROSSMANITH H.P, UENISHI K., 2000 -
One-Dimensional block model for bench blasting - Fragblast vol.4 #3-4 2000

ROSSMANITH H.P, 2006 -
The Mechanics and physics of advanced blasting-waves, shocks, fracture, damage, impact and profit – Short Course FragBlast8 (May 2006)

SOUERS. P.C., 1997,
Size effect and Detonation Front Curvature – 1997 Topical Conference on Shock Compression of Condensed Matter. Ahmerst, MA

TOSELLO R.(D.G.A)., 2006 - Ondes De Choc & Ondes de Détonation (2005 – 2006) - Cours de Detonique ISITV
Shock Waves & Detonation Waves, ISITV course