

Etude de la comparabilité énergétique de la cartouche AutoStem avec des explosifs détonants conventionnels

Cohen, J, 2012 Non-Detonating Solutions (Pty) Ltd

1. Introduction

Cet article vise à définir la capacité énergétique de la cartouche AutoStem (« cartouche AS ») par rapport à l'énergie générée par les explosifs détonants conventionnels.

Le rapport entre l'énergie et la pression est développé en décrivant les variables ayant le plus d'impact sur les capacités de travail de la cartouche AS.

Un modèle simplifié (et estimatif) basé sur le principe de la conservation de l'énergie est dérivé afin de déterminer de manière approximative les valeurs d'utilisation de la cartouche AS en fonction de l'énergie interne et la résistance de la roche.

Le contenu énergétique est ensuite employé pour dériver un rapport d'équivalence de la charge spécifique (CS_{eq}) de la cartouche AS, qui décrit sa puissance au sens conventionnel du terme.

2. Spécifications techniques

La cartouche AS est constituée d'un mélange à 65 % de comburant (NA) et 35 % de nitrocellulose (NC). Ci-dessous, les données relatives à ces deux composants :

- Energie spécifique NC (S341) : 1 020 joules/g
- Energie spécifique NA : 1 590 joules/g
- Energie spécifique cartouche AS : 1 419 joules/g
- Masse molaire NC : 23,5g/mol
- Masse molaire NA : 80,05 g/mol
- Covolume NC : 1,009 cm³/g

L'énergie spécifique peut être définie comme l'énergie libérée par une substance, mesurée en joules par gramme de substance. La cartouche AS présente une énergie spécifique d'environ 1 419 joules/g, qui représente sa capacité de travail.

Le Tableau 1 compare la capacité énergétique de la cartouche AutoStem à l'énergie générée par plusieurs explosifs conventionnels communs :

Explosif conventionnel	Energie
Trinitrotoluène (TNT)	4 100 joules/g
C4	5 494 joules/g
PETN	6 800 joules/g
Nitroglycérine	6 150 joules/g
Semtex	6 810 joules/g

Tableau 1 : énergie spécifique des explosifs communs

A noter que même si l'énergie spécifique de la nitrocellulose contenue dans la cartouche AS est de 1 020 joules/g, il existe des poudres propulsives à la nitrocellulose dont l'énergie spécifique peut dépasser 6 000 joules/g.

La chaleur latente (Q_{ex}) est définie comme l'énergie échangée avec le milieu extérieur lors du changement d'état (solidification, fusion, vaporisation, etc.) d'une substance, sans changement de température. L'énergie Q_{ex} est consommée dans le cadre de la réaction chimique rompant les liaisons lors du changement d'état et n'est utilisée que de manière extrêmement limitée pour le travail, en raison de sa consommation rapide. La chaleur latente de la cartouche AS NC est de 3 759 j/g.

Les calculs effectués dans cet article admettent qu'aucune chaleur latente n'est disponible pour le travail.

3. Pression : fonction de l'énergie spécifique et du volume

La pression théorique maximale s'exerçant dans un trou de forage peut être calculée à l'aide de l'équation suivante :

$$P_{max} = \frac{E_s}{V} - P$$

où

- P_{max} : pression théorique maximale
- E_s : énergie spécifique
- V : volume occupé par la cartouche dans le trou ($\pi \times r^2 \times h$)
- M : masse totale de la cartouche AS
- P : covolume

En prenant les valeurs d'une cartouche AS de 40g, P_{max} équivaut à environ 490 MPa. L'équation ci-dessus permet de mettre en lumière les rapports suivants :

$P \propto E_s$: la pression est proportionnelle à l'énergie spécifique

$P \propto m$: la pression est proportionnelle à la masse de combustible

$P \propto \frac{1}{v}$: la pression est inversement proportionnelle au volume de la cartouche

En d'autres termes, pour maximiser la pression générée par la cartouche AS, il est possible d'utiliser une NC à haute teneur énergétique, ce qui introduit une énergie spécifique plus élevée dans le système d'allumage. Sinon, le volume de la cartouche AS peut être limité à sa valeur minimale.

4. Force : fonction de la pression et de la surface

La force, mesurée en newtons (N) peut être calculée à l'aide de l'équation suivante :

$$\text{Force} = \text{Pression} \times \text{Surface}$$

Compte tenu de la pression générée par une cartouche AS dans un trou confiné et la surface de la cartouche agissant contre les parois du trou, il est possible d'estimer la force exercée par la cartouche AS sur le trou.

En prenant les valeurs d'une cartouche AS de 40 g et l'équation ci-dessus, la force exercée par la cartouche AS sur le trou est de 9 004 974 N.

Le tableau suivant illustre la résistance à la compression et à la traction des roches communes. La roche se fracture lorsqu'elle dépasse son seuil de résistance à la traction, qui représente la contrainte maximale supportable par le matériau.

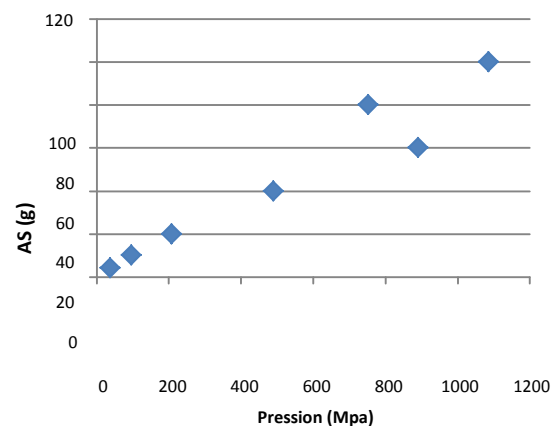
Type de roche	Résistance à la compression	Résistance à la traction
Granit	250 MPa	25 MPa
Basalte	300 MPa	30 MPa
Marbre	100-250 MPa	7-20 MPa
Grès	20-170 MPa	4-25 MPa
Calcaire	30-250 MPa	5-25 MPa

Pour démontrer la puissance de la cartouche AS, prenons l'exemple du granit. L'équation ci-dessus permet de calculer la force requise pour le fragmenter. Avec la résistance spécifique du granit à la traction (25 MPa) et la surface de la cartouche AS de 40 g, on obtient 384 000 N de force nécessaire.

Le potentiel disponible de la cartouche AS de 40 g est de 9 MN, soit plus de 30 fois la résistance à la traction du granit. Ce résultat est confirmé par le calcul de la pression équivalente à l'aide de la résistance à la traction

de la roche et des caractéristiques de pression de la cartouche AS.

Très importante, la montée en pression est largement supérieure à la résistance à la traction des roches communes. Le graphique suivant démontre le rapport entre la pression générée (en MPa) et le format de la cartouche AS (en grammes). Ce rapport dépend pour beaucoup de la surface de la cartouche, comme l'indique la baisse de pression intervenant en raison de l'augmentation de la longueur de la cartouche lorsque sa taille passe de 60 à 80 g.



À des pressions plus élevées, ce graphique ne représente pas la réalité, car un seuil maximal de pression finit par être atteint malgré l'augmentation de la masse de la cartouche AS : lorsque la roche commence à gonfler, la pression baisse rapidement.

La valeur de ce seuil est fonction de la courbe pression/temps et de la vitesse de propagation des fractures de la roche. D'autres études seront réalisées à ce sujet.

RhineMettalDenel a par ailleurs effectué des essais de pression en chambre fermée, qui ont indiqué une valeur de pic de pression de 213 MPa pour la poudre propulsive NC de la cartouche AS.

Il est intéressant d'observer que la grande majorité de l'énergie est donc consommée pour la poussée et que la quantité utilisée pour la fragmentation elle-même est bien moindre.

La puissance d'abattage de la cartouche AS étant largement supérieure à celle requise pour briser la roche, la capacité de poussée est donc directement liée à l'efficacité du bourrage et à la configuration de chargement.

Si l'on reprend l'équation présentée au paragraphe 3, l'équivalent de 4 g de cartouche AS développe une pression de 28,35 MPa, suffisante pour fracturer les roches les plus dures. La pression résiduelle sert à écarter la roche, comme nous le démontrerons au paragraphe 5.

5. Energie : modèle d'équivalence

L'équivalent de quatre grammes de cartouche AS génère 5 676 joules de travail (en admettant une énergie spécifique de la cartouche AS de 1 419 joules/g). L'énergie libérée sous forme de pression et de chaleur peut ensuite être estimée en tant qu'énergie cinétique (E_k) et énergie potentielle (E_p).

L'énergie cinétique est l'énergie générée par le mouvement, soit :

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2$$

L'énergie potentielle est l'énergie inhérente au déplacement, soit :

$$E_p = mgh$$

D'après les valeurs d'une cartouche AS de 40 g, l'énergie générée par l'allumage de l'équivalent de 4 g de cartouche AS est consommée dans la fracturation, ce qui laisse 36 g pour réaliser le travail de poussée. La teneur énergétique de l'équivalent de 36 g de cartouche AS est d'environ 51 084 joules.

Le tableau suivant contient les résultats du modèle développé à partir des équations E_k et E_p . Il indique les différentes hauteurs de projection, vitesses initiales et distances de projection de roches pour 5 tonnes de granit, en utilisant le principe de conservation de l'énergie.

Les pertes d'énergie interviendront sous forme de son et surtout de diverses pertes mécaniques.

AS (g)	40	60	80	100
Energie (j)	51 084	79 464	107 844	136 224
Hauteur (m)	1,0	1,6	2,2	2,8
Vitesse (km/h)	16,7	20,3	23,6	26,6
Distance (m)	4,5	5,6	6,6	7,4

Le modèle développé permet de calculer de manière théorique les variables suivantes :

- Energie disponible pour le travail (qui sera utilisée ultérieurement pour dériver un « facteur de gaz ») ;
- Hauteur potentielle de projection de roche ;
- Vitesse de projection de roche ;
- Distance maximale de projection de roche.

Ce modèle décrit le potentiel de projection (ou de poussée) en fonction de la quantité d'AS et de la masse/du volume de roche. Ces informations permettent de dériver un « facteur de gaz » très simplifié.

Facteur de gaz = f(quantité GBT ; masse de roche)

L'intégration de certaines valeurs mécaniques de fracture de base pourrait toutefois permettre de dériver un « facteur de gaz » plus proche de la réalité, qui inclurait les dimensions de fracturation (et donc le volume implicite de roche). Grâce à ces informations, une équation calculant le « facteur de gaz » serait fonction de la quantité d'AS et du profil de forage, deux facteurs maîtrisés par l'opérateur.

Facteur de gaz = f(quantité GBT ; profil de forage)

6. Equivalence des charges spécifiques

Dans le domaine des explosifs conventionnels, la charge spécifique (CS) permet de décrire la quantité d'explosif utilisée pour abattre un certain volume de roche :

$$CS = \frac{\text{grammes explosif}}{\text{tonnes roche}}$$

Si l'on souhaite dériver la charge spécifique équivalente de l'AS, les limitations suivantes doivent être soulignées :

6.1 La comparabilité d'une charge spécifique suppose un niveau de fragmentation constant. Sauf si ce niveau de fragmentation est clairement défini, l'utilité d'une charge spécifique est donc limitée à une acception plus générale de la puissance relative.

6.2 Les cartouches AS ne pulvérisent pas la roche (contrairement aux ondes d'une détonation). La distribution des tailles de fragmentation sera donc moins étendue avec une cartouche AS qu'avec les explosifs détonants conventionnels. La taille des fragments obtenus avec une cartouche AS

résulte directement de la profondeur et de l'espacement des trous.

6.3 Parce que la technologie AS est conçue pour fracturer et non pulvériser, sa charge spécifique inférieure peut être considérée comme étant aussi efficace que celle, pourtant plus élevée, d'un explosif conventionnel.

6.4 Une charge spécifique AS numériquement inférieure n'engendre pas nécessairement des contraintes relatives inférieures (à celles générées par la charge spécifique numériquement supérieure d'un explosif conventionnel) ni un facteur d'utilisation inférieur, en raison de la différence voulue de résultat entre la pulvérisation d'une explosion conventionnelle et la fragmentation générée par une cartouche AS.

Cette efficacité relative, qui met en équation la charge spécifique d'un explosif et celle de l'AS (d'après la différence intentionnelle de taille de fragmentation) peut donc être exprimée à l'aide d'une constante (K), soit :

$$CS_{GBT} = K \times CS_{\text{explosif}}$$

Compte tenu de ce qui précède, la charge spécifique d'un explosif conventionnel peut être liée à la CS_{AS} comme suit :

$$CS_{GBT} = \frac{CS_{\text{explosif connu}}}{S_{\text{explosif connu}}}$$

Où :

$$S_{\text{explosif connu}} = \frac{q_{AS}}{Q_{\text{explosif connu}}}$$

Si l'on combine les résultats des deux équations ci-dessus dans le rapport d'équivalence des charges spécifiques suivant :

$$CS_{GBT} = CS_{\text{explosif connu}} \times \frac{Q_{\text{explosif connu}}}{1419}$$

Nous avons vu plus haut qu'une CS_{AS} plus élevée ne correspond pas à un taux d'utilisation d'explosif inférieur, en raison de la distribution différente des tailles de fragmentation.

Si l'on veut effectuer une comparaison directe, la valeur de K doit être déterminée d'après les résultats d'essais sur le terrain, afin d'évaluer l'efficacité de l'AS par rapport à celle des explosifs conventionnels.

Les valeurs de $CS_{\text{explosif connu}}$ sont tirées du suivi sur site des abattages à base d'explosifs conventionnels.

Explosif conventionnel	Valeurs Q
Trinitrotoluène (TNT)	4 100 joules/g
ANFO	3 280 joules/g
Peroxyde d'acétone	3 403 joules/g
Amatol	4 797 joules/g
Tetryl	5 125 joules/g
RDX	6 560 joules/g
C4	5 494 joules/g
PETN	6 800 joules/g
Nitroglycérine	6 150 joules/g
Semtex	6 810 joules/g

7 Conclusion et perspectives

Cet article visait à quantifier l'énergie générée par la cartouche AS et à la comparer à celle des explosifs détonants conventionnels.

Il entendait également déterminer les principales caractéristiques de l'AS ainsi que l'ordre de grandeur des pressions et forces générées.

Un modèle rudimentaire basé sur la conservation de l'énergie a été développé afin de décrire les valeurs prévues des cartouches AS (en termes de disponibilité de l'énergie et de projection).

Enfin, les valeurs d'énergie spécifique ont permis d'établir un rapport initial entre la charge spécifique des explosifs conventionnels et celle de l'AS. D'autres études seront réalisées dans ce domaine.

- 7.1 La pression augmentera en cas d'utilisation d'une poudre propulsive possédant une énergie spécifique supérieure.
- 7.2 La poudre propulsive NC utilisée à l'heure actuelle possède une énergie spécifique de 1 020 joules/g, alors que certaines poudres propulsives peuvent atteindre 6 000 joules/g.
- 7.3 La pression peut être accrue en réduisant le volume de la cartouche.
- 7.4 Les cartouches AS libèrent plus de 30 fois la force requise pour briser une roche de granit dur. Ce facteur se reflète sur la pression et la force.
- 7.5 La pression créée par notre cartouche dépend de son poids et de son volume. Une cartouche de 40 g génère une pression de 400 à 500 MPa sur toute sa longueur confinée.
- 7.6 En réalité, un seuil de pression maximale apparaît, car la pression baisse une fois la roche brisée.
- 7.7 La cartouche AS générant une puissance de fragmentation considérable, la capacité de poussée est directement liée à l'efficacité du bourrage et à la configuration de chargement.

- 7.8 L'équivalent de 4g de cartouche AS suffit à propager la fracturation à l'intérieur d'une roche.
- 7.9 Un modèle rudimentaire basé sur la conservation de l'énergie a été développé pour quantifier les valeurs prévues de la cartouche AS.
- 7.10 Une équation rapprochant la charge spécifique d'un explosif conventionnel et celle de l'AS a été développée.

8 Travaux ultérieurs

Les travaux présentés dans cet article seront développés ultérieurement afin d'intégrer le rapport entre la fragmentation et la dérivation d'un « facteur de gaz », par gramme d'AS.

9 Références :

Dr S. Dessureault, Université d'Arizona, Mining and Geology Engineering, 2006

RhineMetallDenel, communications 2011-2012

N. Kubota, *Propellants and Explosives: Thermochemical Aspects of Combustion*, publié par Wiley-VCH, 2002

D. Roylance, Department of Materials Science and Engineering, MIT, *Introduction to Fracture Mechanics*, 2001

H. Krause, *New Energetic Materials*, publié par Wiley-VCH, 2005

Chu et al, *Permeability Enhancement using high energy gas fracturing*, 1986

Warpinski et al, *High Energy Gas Fracturing*, Sandia Laboratories, 1978