

Balles en vol: la balistique extérieure pratique

La science expliquée simplement
aux tireurs qui ont envie de comprendre

Module 1: Le coefficient balistique

Premier slide

Que Dieu me garde de l'illusion de tout savoir.

Je ne prétends pas détenir la vérité absolue.

Toute correction ou complément seraient
bienvenus!

Fin du premier slide.

Le coefficient balistique: La clé à tout

- C'est la capacité d'un projectile à garder sa vitesse malgré la résistance de l'atmosphère
- L'inverse du ralentissement subi dû à la r. de l'a.
- Comme conséquence, ça définit tout:
 - la vitesse dans chaque point de la trajectoire
 - la dérive au vent
 - la chute / élévation par rapport à la ligne de visée

Le BC: de quoi ça dépend

- La forme, plus ou moins aérodynamique
- Le poids: à forme égale, le BC est directement proportionnel au poids

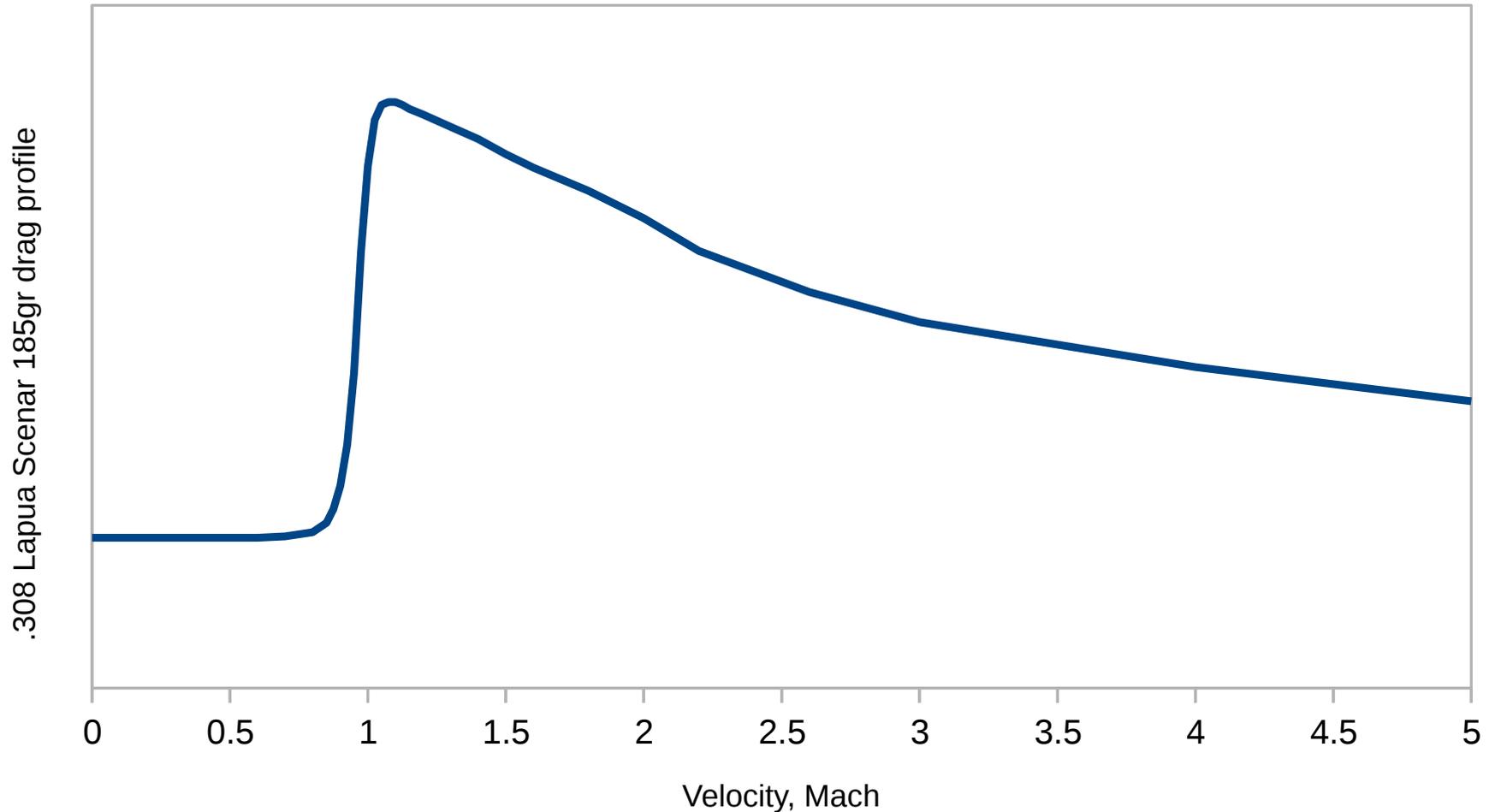
BC, le grand mystère

- Aucune autre notion de la balistique n'a autant de légendes autour
 - mythes
 - explications mal comprises
 - espoirs trahis
 - déceptions en cible
- La terminologie n'aide pas

"There is no spoon"

- Il n'existe pas de BC comme caractéristique d'une balle
- Il existe deux définitions du BC – celui utilisé par les ingénieurs en aérodynamique, et celui utilisé par les tireurs
- Il existe plusieurs définitions d'un BC "tireur"
- Pour la même définition du BC "tireur", et pour le même projectile, il existe plusieurs valeurs justes

Le vrai BC dépend de la vitesse



(Lapua Scenar .308 185gr, données du fabricant)

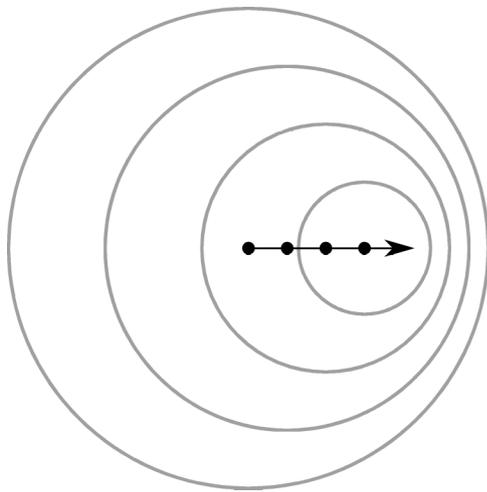
Pourquoi Mach?

- Par ce que Ernst Waldfried Josef Wenzel Mach
- Mach = multiple de vitesse de son
- Dépend de la température; p.ex. à 20°C, Mach 1 correspond à 343 m/s, à -20°C – 319 m/s
- Les valeurs Mach sont utilisés en balistique pour indiquer la vitesse (plutôt que des m/s ou km/h), car le profil de résistance (cf. slide précédant) est déterminé par la vitesse du son
- Plus de détails sanglants nous attendent dans le Module 7 – Atmosphère

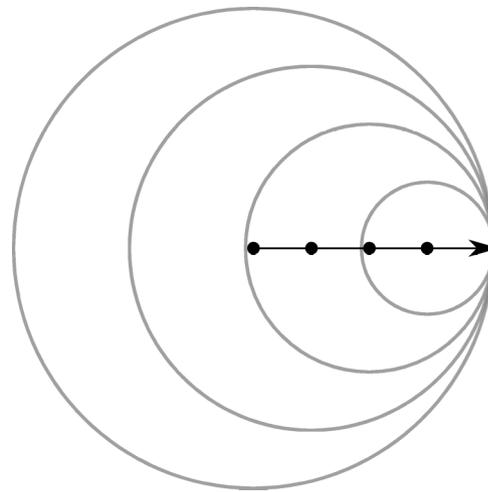
Super-, trans- et sub-sonique

- En fonction de la vitesse du projectile, on distingue 3 zones / segments du trajectoire
- Les super- et sub-soniques sont faciles et prévisibles
- Le transsonique est un vrai défi pour la stabilité de la balle (nous y reviendrons dans les modules suivants); les calibres à projectiles relativement longs (et les fusils qui vont avec) sont généralement conçus pour être employés soit essentiellement dans le super-, soit essentiellement dans le sub-, mais éviter si possible le segment entre les deux.

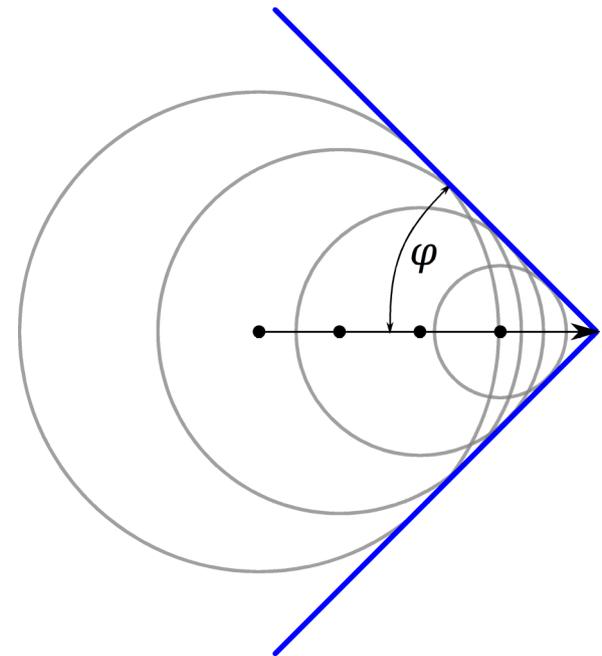
Super- trans- et sub- en images



$$v < v_s$$



$$v = v_s$$



$$v > v_s$$

(merci Wikipédia)



Points d'impact

1.1: Pour un ingénieur, il n'existe pas de valeur absolue de BC pour une balle. Il existe seulement une valeur pour une vitesse donnée.

1.2: La résistance de l'air est la plus grande à l'approche de la barrière du son (\approx Mach 1.2 - 1.1). Lors du passage de la barrière du son, dans le segment transsonique du trajectoire, on observe un changement radical dans les caractéristiques de résistance de l'air.

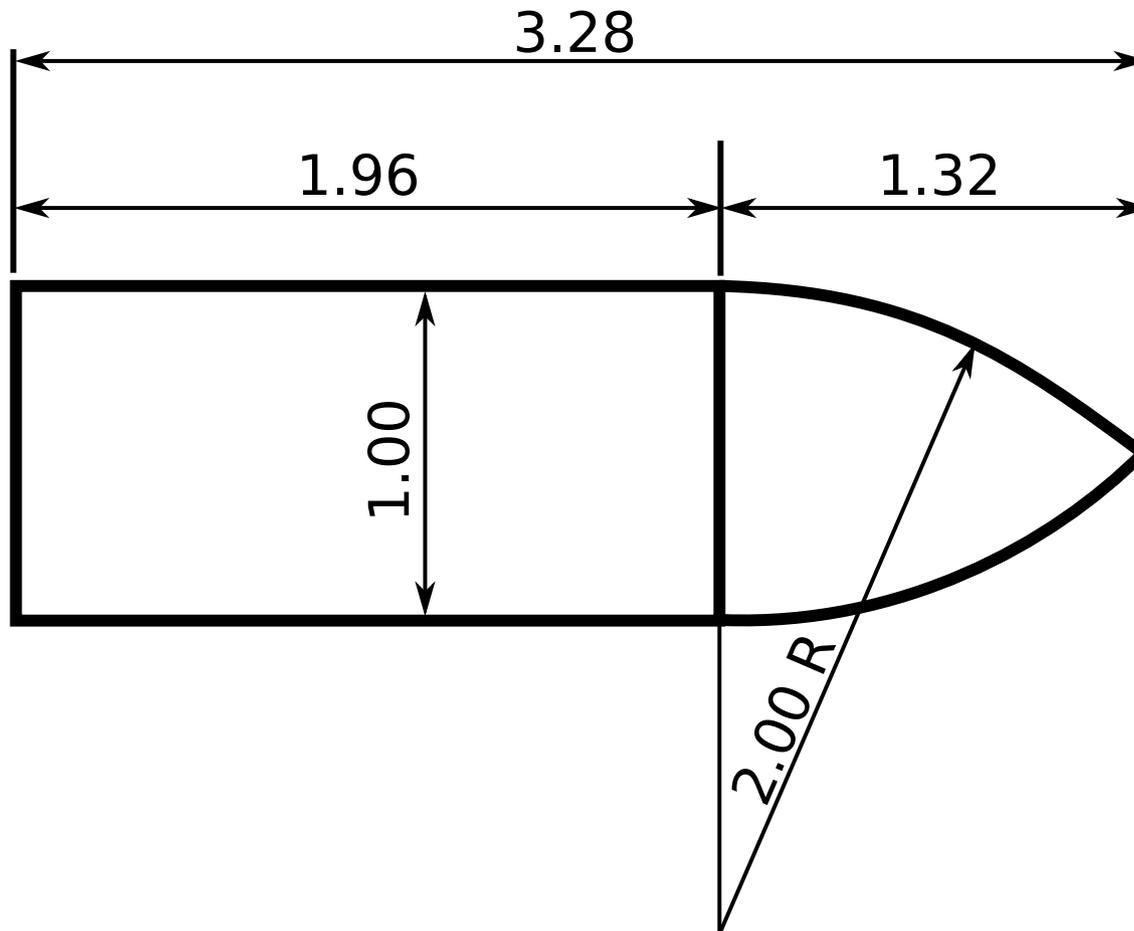
Un seul chiffre?

- Une valeur unique pour le BC ne se réfère pas au vrai BC "ingénieur" (qui dépend de la vitesse)
- Un BC "tireur" se réfère à un modèle d'un projectile standard

Modèles standard

- Puissance de calcul limitée, mesures expérimentales difficiles à obtenir pour chaque projectile individuel
- Projectile standard, dont la trajectoire est connue et vérifiée
- On suppose que la résistance de l'air est juste BC fois plus petite (donc la capacité de garder la vitesse est BC fois plus grande) que celle du projectile standard (mais du reste est pareille)
- Généralement le BC "tireur" est suivi d'une indication du modèle, ex. BC G7 = 0.278
- Si aucune indication, ça doit être du G1

G1: l'archéologie moderne

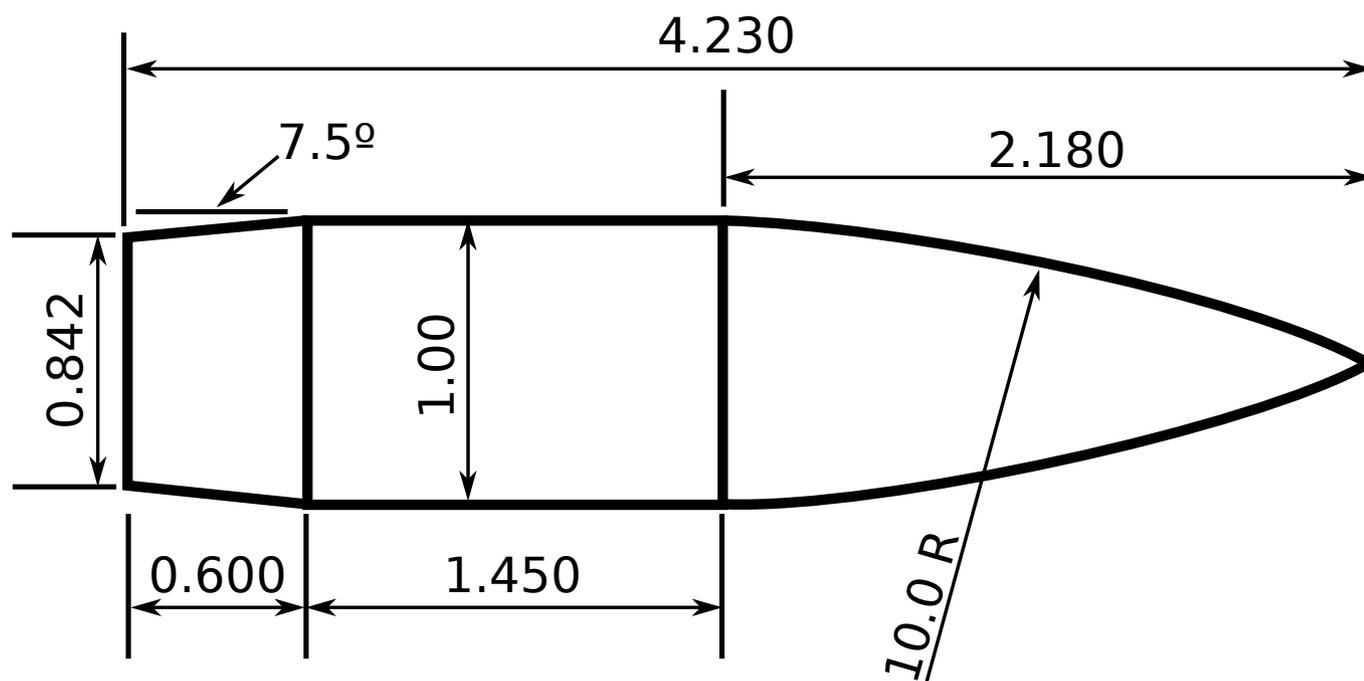


Projectile standard G1: le modèle le plus ancien et toujours le plus répandu

Herr Krupp?

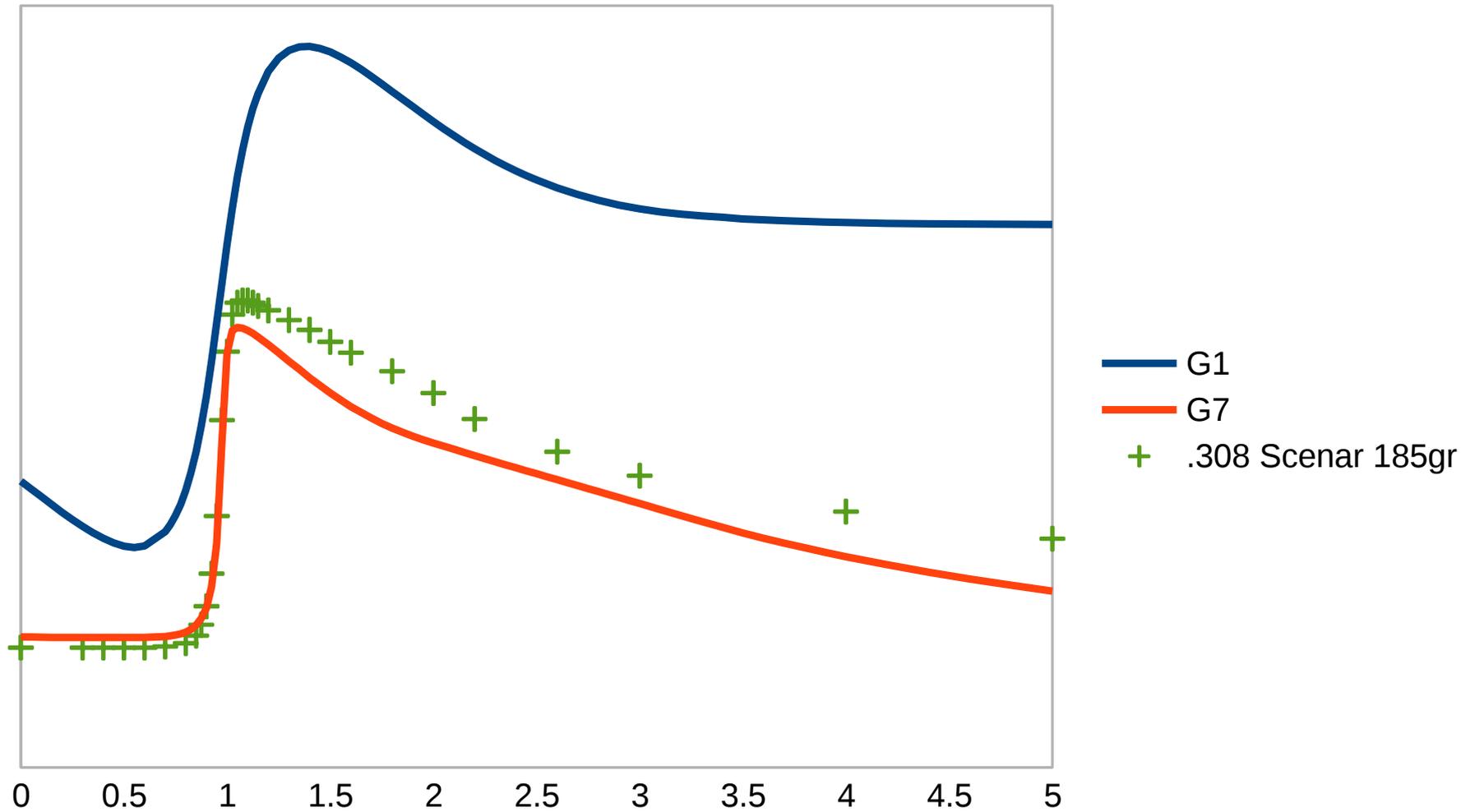
- La géométrie d'une balle définit la résistance de l'air
- Moins la balle ressemble à un modèle, plus il y a d'erreur
- De tous les modèles standard, G1 ressemble le moins aux balles de fusil modernes
- L'énigme principale de la science balistique actuelle: pourquoi toujours le G1?

G7: bienvenu au 3ème millénaire



Projectile standard G7

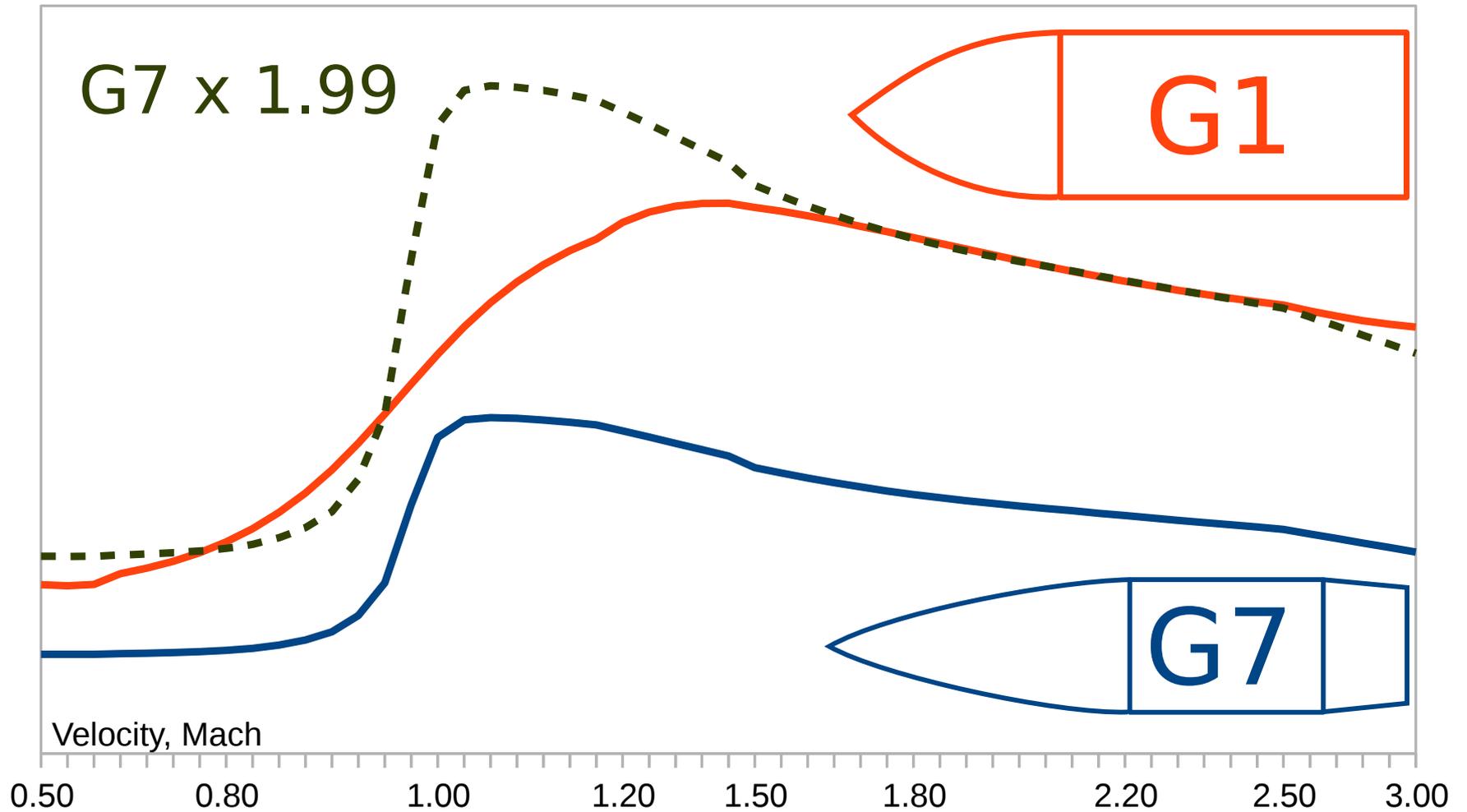
Bienvenu à la réalité



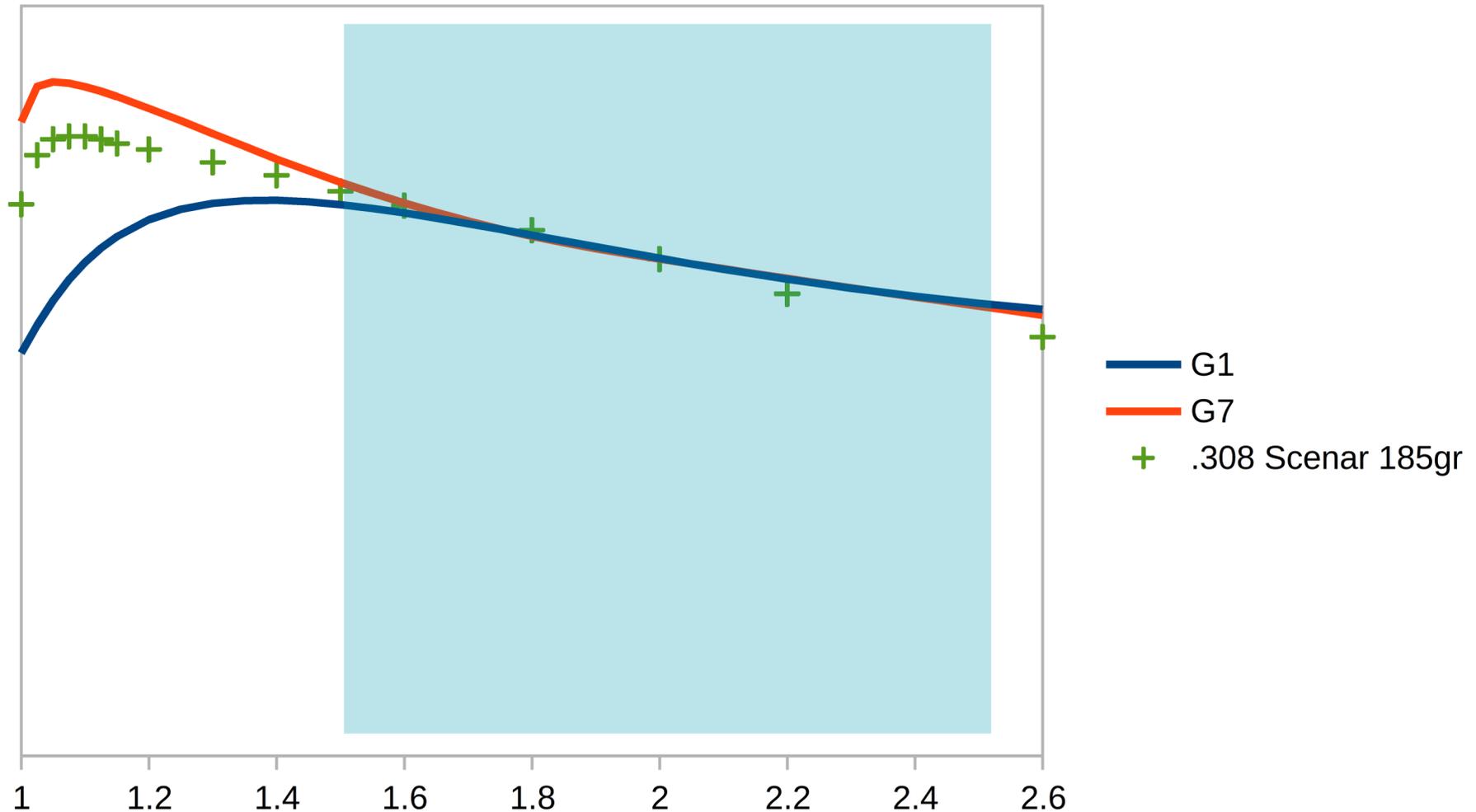
La réalité contre-attaque

- Est-ce que des centaines de milliers de tireurs qui ont utilisé le modèle G1 pendant plus d'un siècle ont touché leur cibles juste par hasard?
- Le graphique du slide précédant est, en substance, du gros n'importe quoi, parce que:
 - On ne tient pas compte du BC en tant que tel. Le BC (par définition) est sensé compenser la différence de poids et de géométrie (multiplier la résistance de l'air d'un modèle standard par le coefficient)
 - On ne tient pas compte des plages de vitesse typiques pour les balles modernes

Le BC rentre en jeu

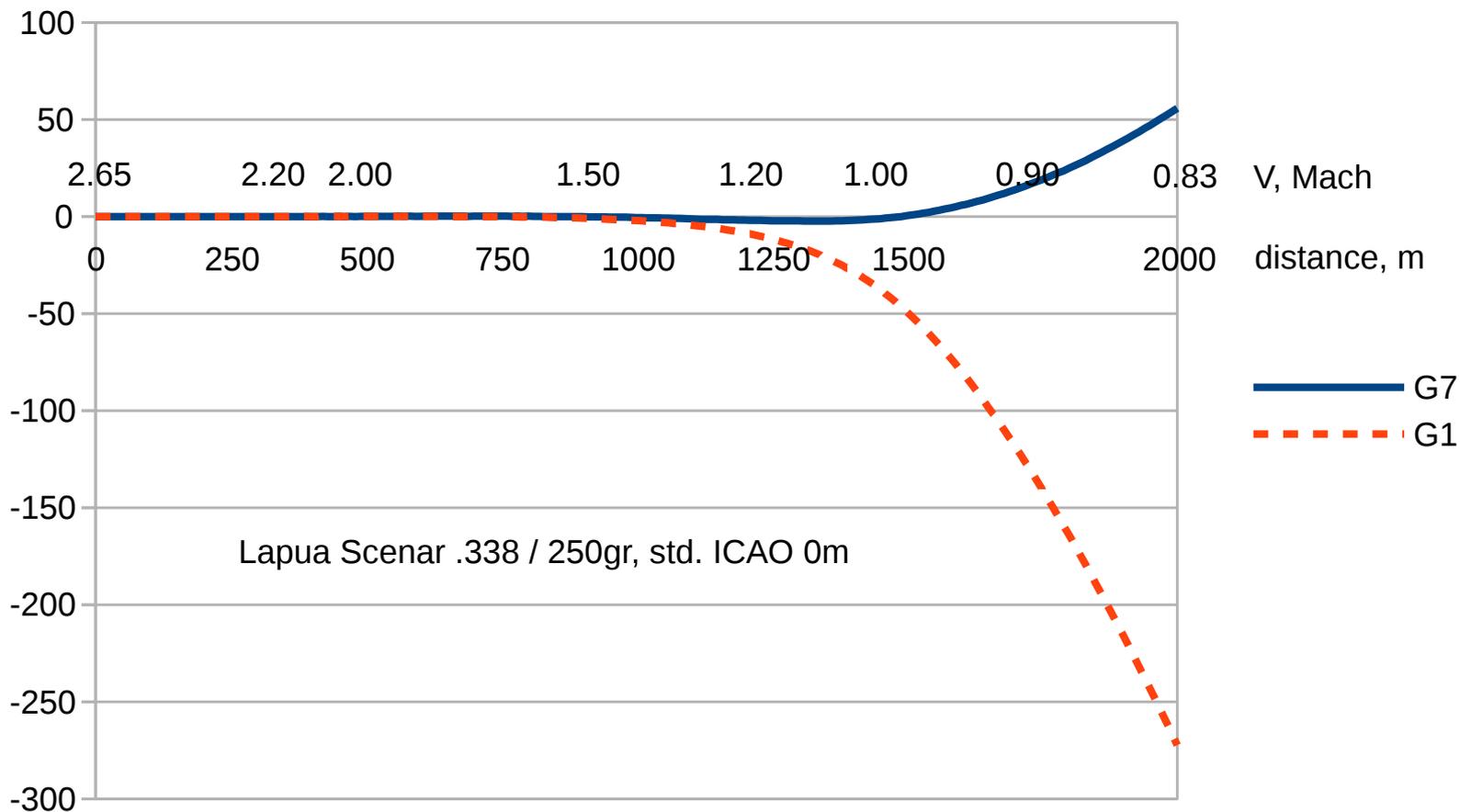


Meilleures salutations de la part de la réalité réelle



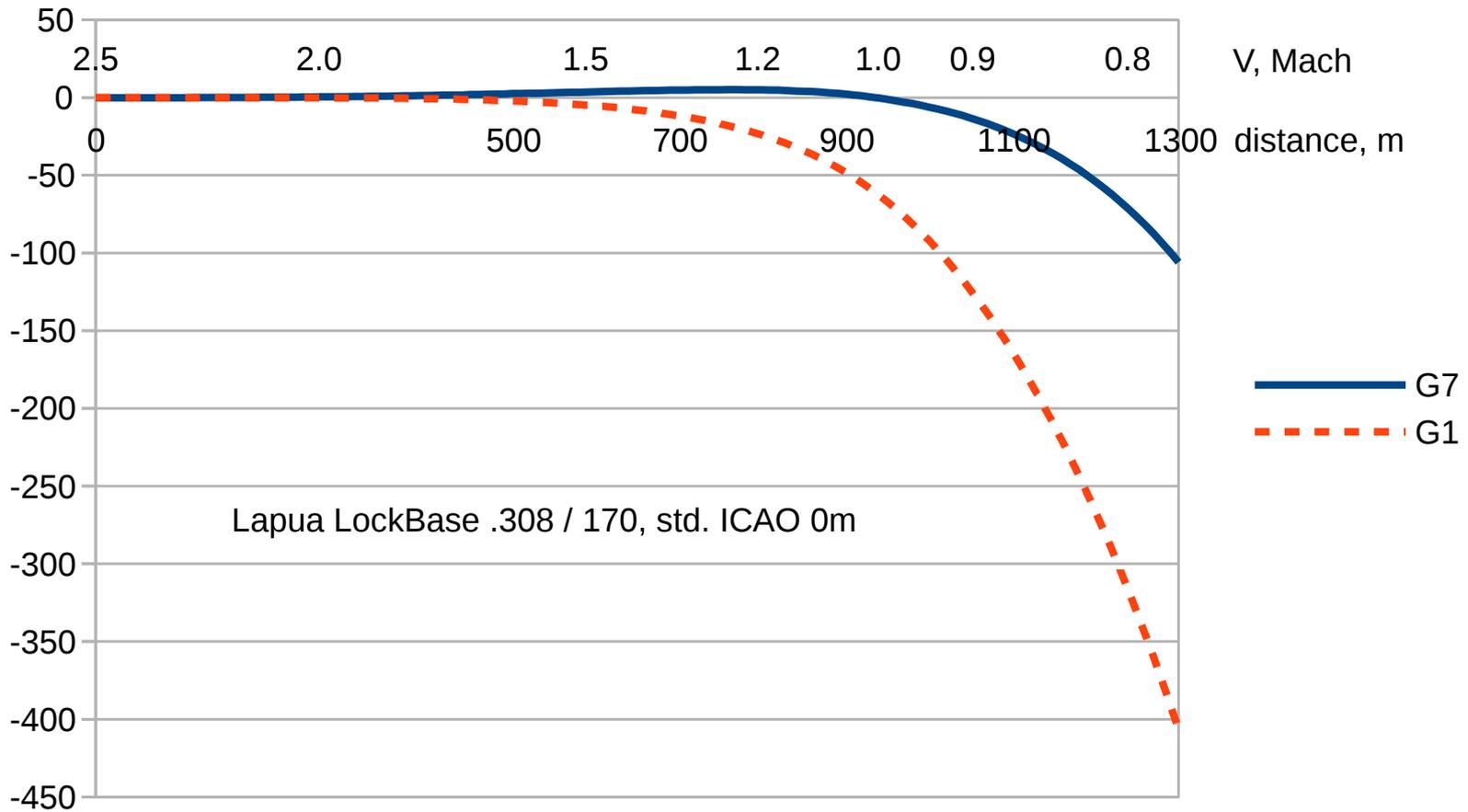
Du coup, la différence est beaucoup moins dramatique
(et c'est la même chose pour toutes les balles réelles)

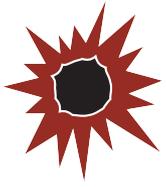
La pratique sonne à la porte



(Erreurs des modèles standards, cm)

La pratique sonne deux fois





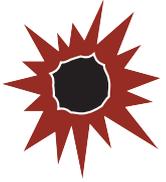
Points d'impact

[valables pour les projectiles "boat tail"]

1.3: En supersonique, la précision des deux modèles – G1 et G7 – est excellente. Dans ces limites, la valeur juste du BC est beaucoup plus importante que le choix d'un modèle ou d'un autre.

1.4: À commencer par le transsonique, G1 sous-estime systématiquement la résistance de l'air; la vraie trajectoire passe plus bas que les prévisions du modèle. En général, ça ne s'accorde plus très bien avec la réalité à partir de Mach 1.2 environ.

1.5: Dépendamment de la géométrie du projectile réel, G7 peut sous-estimer ou sur-estimer la résistance de l'air à longue distance, mais reste dans le juste jusque à environ Mach 1.0 - 0.9 (ce qui pour les calibres différents signifie entre 100 et 400 m plus loin que G1).



Encore des pdi

1.6: Si les modèles "G" autres que G1 et G7 (il y en a encore plein) ne sont pratiquement pas utilisés, c'est qu'il n'y en a pas vraiment besoin. Les projectiles utilisés pour tirer dans le transsonique sont mieux décrits par G7, et pour les autres projectiles le segment supersonique de n'importe quel modèle (généralement G1) suffit largement.

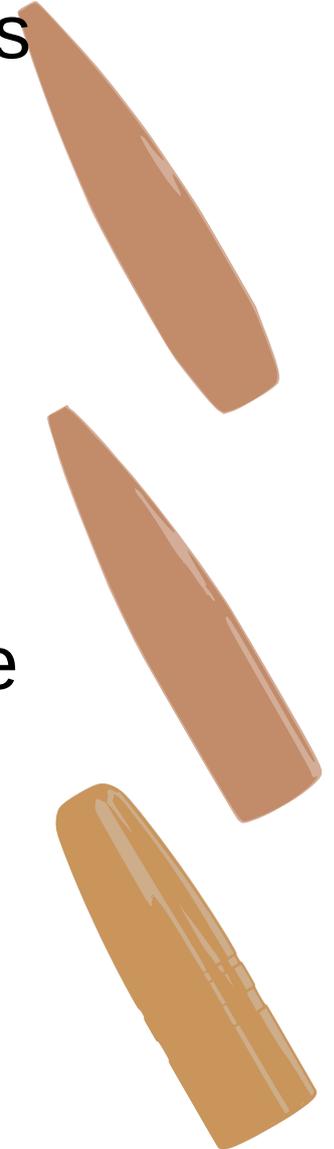
1.7: Il n'y a pas, et il ne peut pas y avoir de modèle balistique universel qui décrit précisément toutes les balles dans le transsonique. Il n'y a pas de miracles.

Les "G" à privilégier

G7 donne de meilleurs résultats pour les longues balles à partie arrière en cône tronqué (en innegliche = "boat tail"), généralement utilisées pour le TLD, parce que le modèle est spécialement prévu pour ça.

Pour des projectiles à partie arrière cylindrique ("flat base"), G7 donne de légèrement meilleurs résultats que G1, mais sous-estime la résistance de l'air en-dessous de Mach 1.0.

Des balles de chasse à pointe arrondie (du peu qu'il leur faut de balistique extérieure) sont généralement mieux servies par G1.



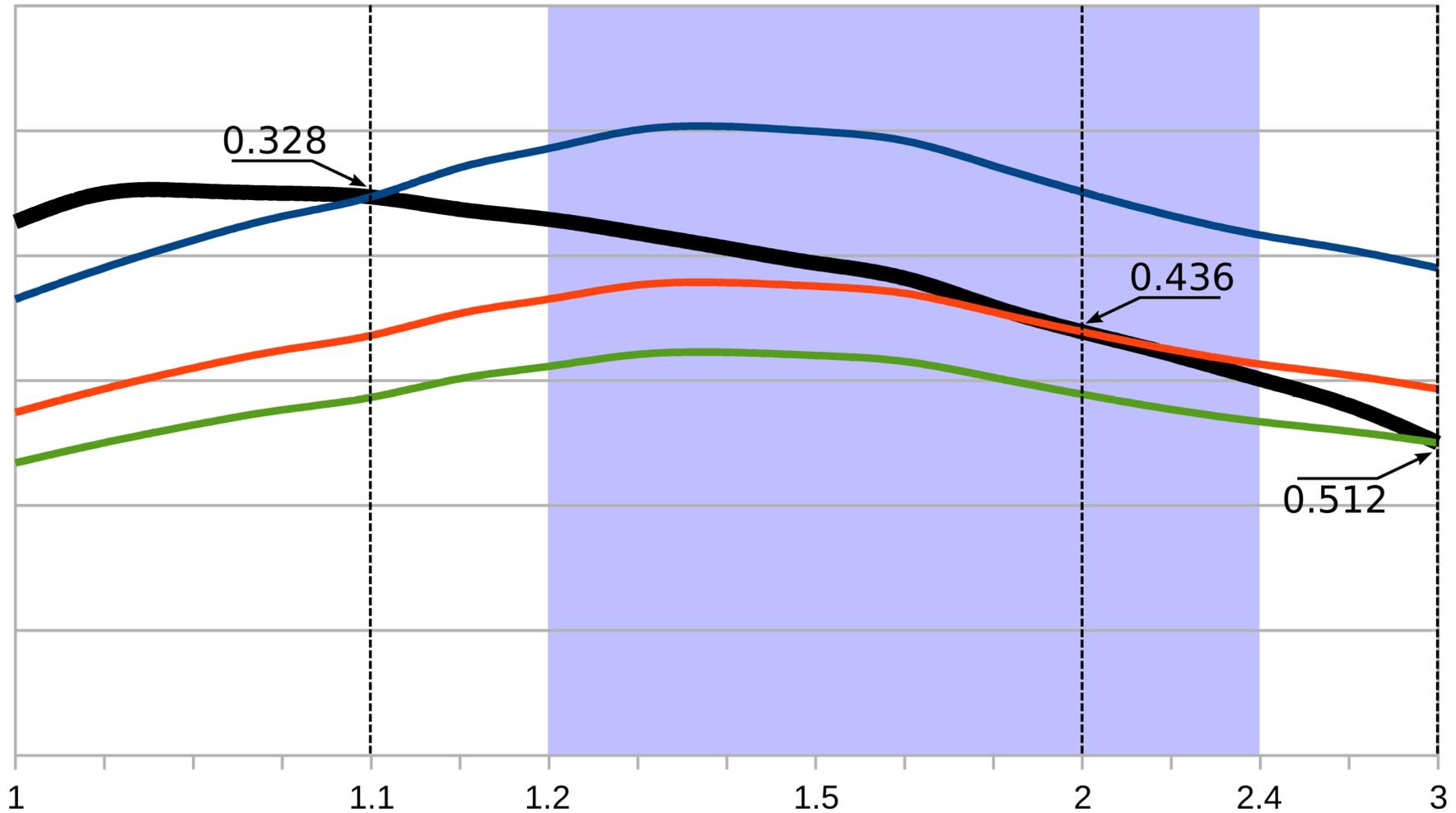
Attention, suspense!

- La forme de balles réelles ne correspond presque jamais à la forme de projectiles standard des modèles standard. Y a t-il un moyen d'améliorer la précision des prédictions?
- Le BC est un paramètre clé qui détermine toute la balistique extérieure. Où et comment peut-on trouver les valeurs BC à utiliser pour un modèle ou un autre?

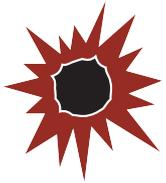
Le problème principal avec le BC

- ... vient tout droit de la définition: la géométrie de balles réelles ne correspond pratiquement jamais au projectiles standard
- Il y a donc une différence plus ou moins grande entre les pronostiques du modèle et la réalité balistique, surtout au-delà du supersonique

Le gros noir Scenar vs. G1



Toutes les valeurs du BC sont, à strictement parler, justes.
Mais justes seulement à une vitesse donnée.



Pour une poignée de pdi

1.8: Il n'existe pas de "vrai" BC G1. Souvent le BC G1 annoncé par le fabricant correspond à la vitesse initiale typique pour le calibre (parce que le BC à haute vitesse est plus grand, et donc plus vendeur). Ce n'est pas toujours la même chose que le BC optimal – valeur compromis qui donne *en moyenne* le plus de précision à des distances typiques d'application d'un calibre.

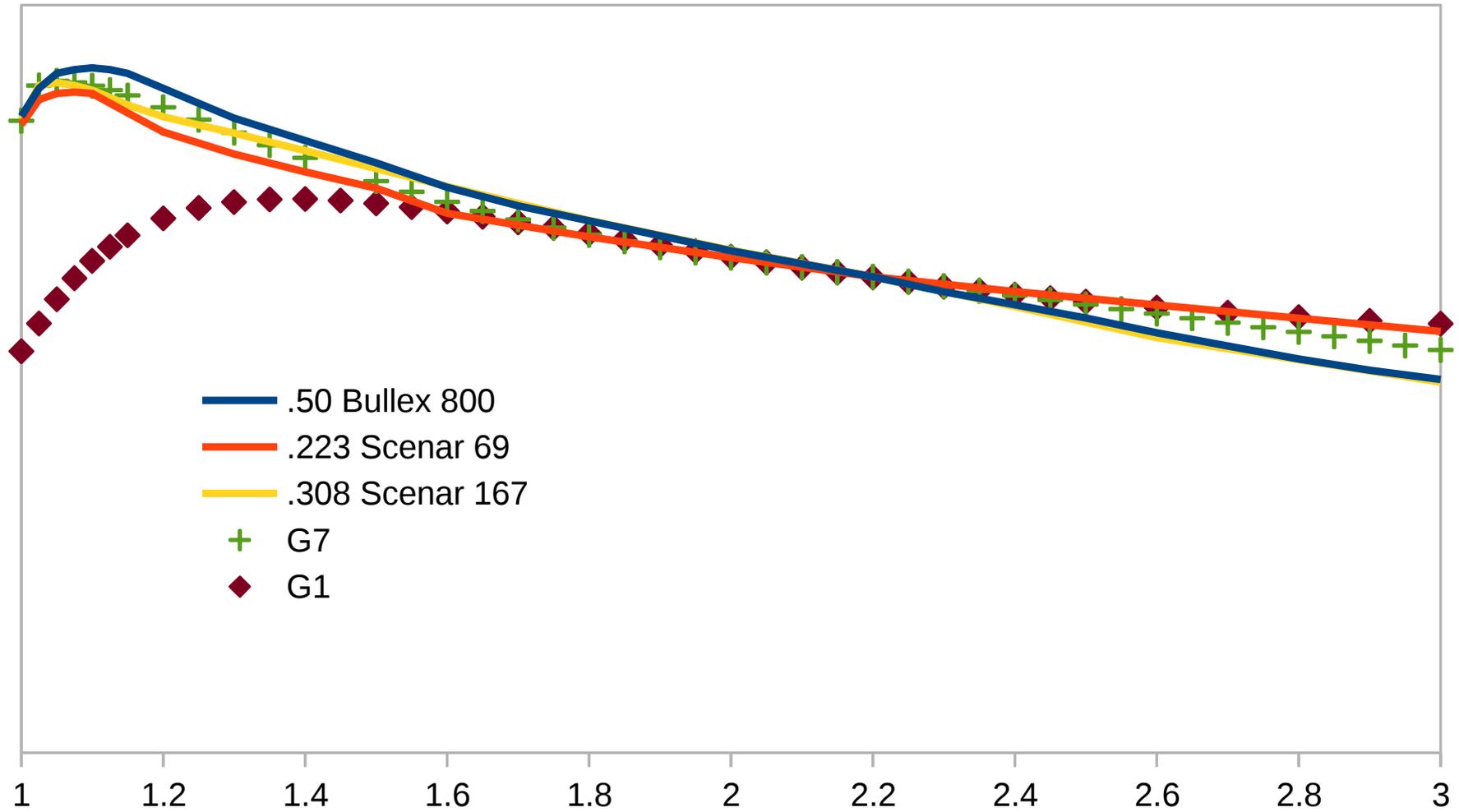
1.9: Quelle que soit la valeur du BC G1 choisie, l'erreur (plus ou moins grande) est inévitable.

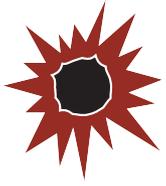
Ceci étant dit...

[question fatidique]

- Comme on a vu, la précision du modèle G1 est suffisante à des distances communes de tir (sauf extrêmes)
- **Mais** pourquoi vivre avec une erreur évitable (quand il y a déjà bien assez d'inévitables)?
- ...et cette émotion inoubliable, quand on voit une cible passé 1000m se coucher du premier coup...
- Il y a une réponse!

Réponse #1: G7





Pour quelque pdi de plus

1.10: Le BC G7 est aussi dépendant de la vitesse, mais dans une bien moindre mesure que le G1, surtout dans le segment transsonique.

1.11: Pour un projectile TLD donné, avec une bonne valeur BC G7 on peut généralement obtenir une très bonne précision jusque à des distances extrêmes pour le calibre.

Réponse #1bis: le chiffre magique

- Si on a uniquement un BC G1 à disposition
- Si il est vérifié et confirmé dans le supersonique
- Si on veut aller au-delà des limites du modèle G1
on peut faire appel au chiffre magique

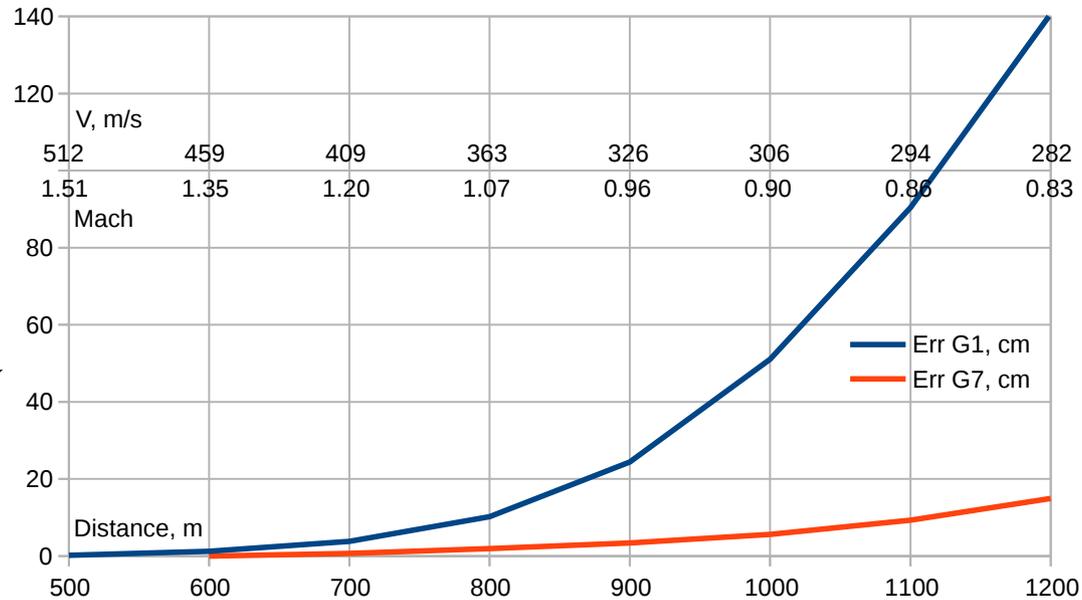
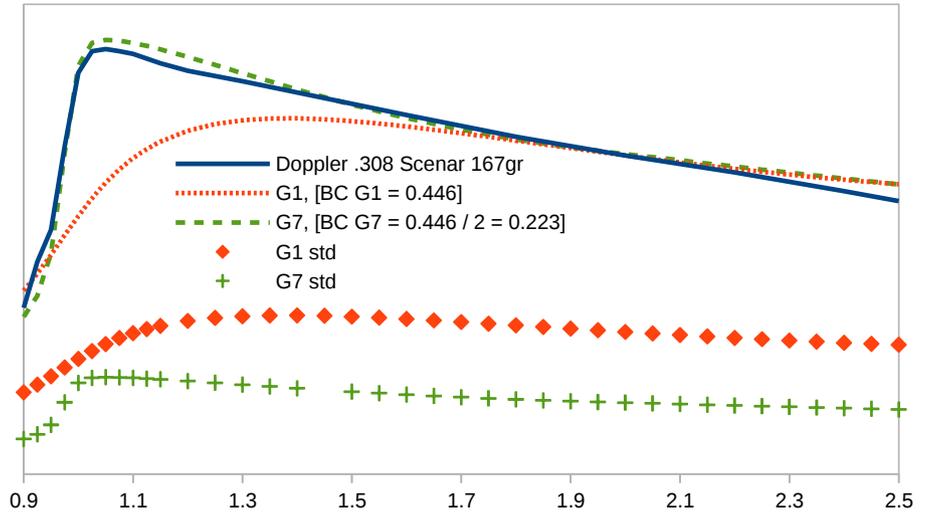
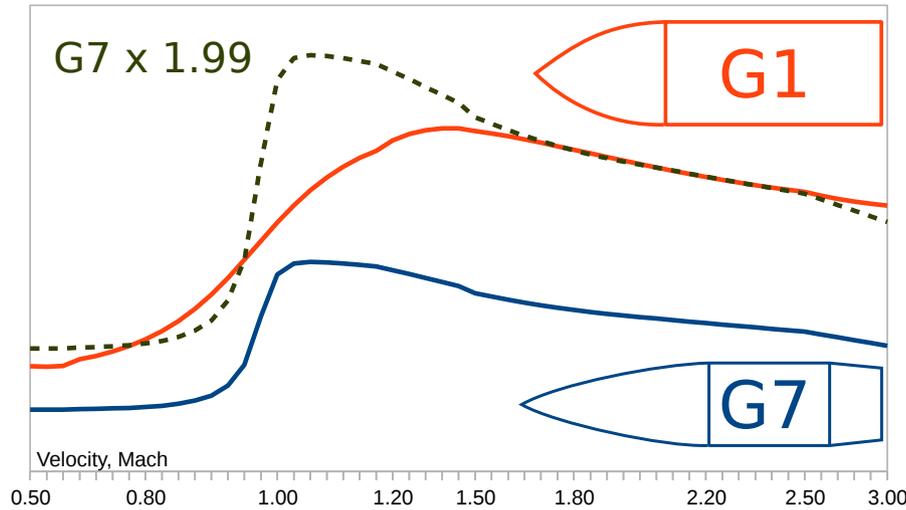
2

- $BC\ G7 = BC\ G1$ divisé par 2 (pour les maniaques, c'est 1.988)
- Le tour de magie a beaucoup de chances de marcher pour les projectiles supersoniques longs (> 4 calibres) à géométrie "spitzer boat tail" (en gros – du G7).

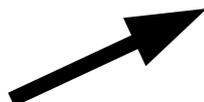
Comment marche le chiffre magique

(rappel d'un slide précédant)

(projectile réel)



Résultat de la magie



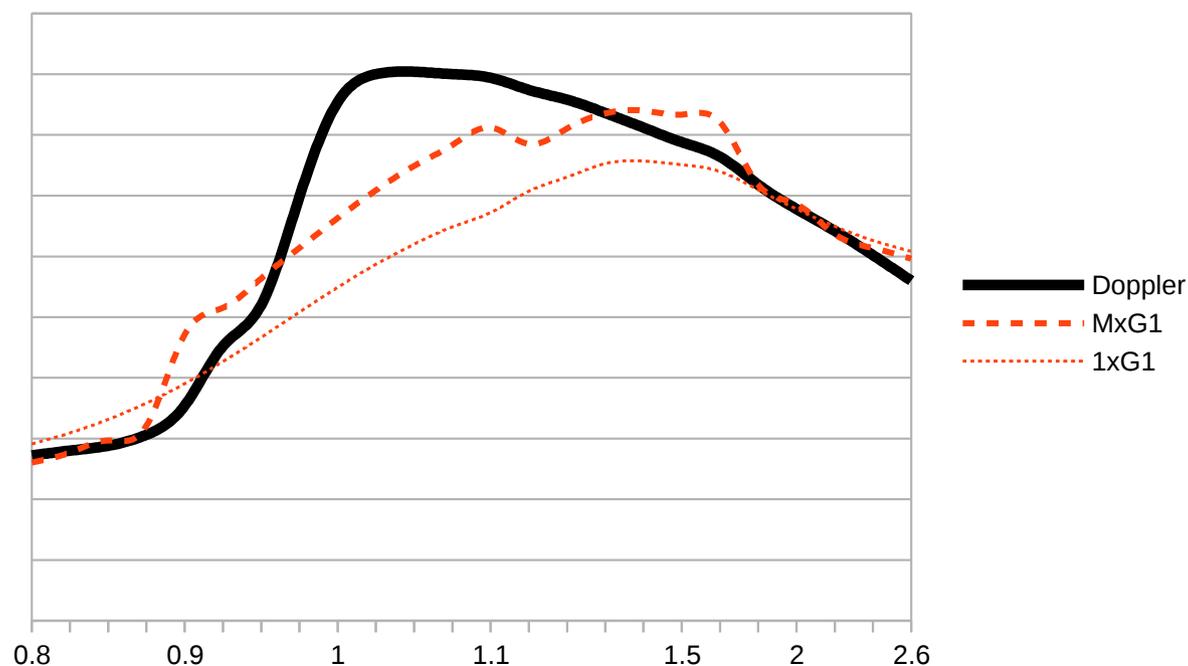
Magie générale

- Conversion BC de n'importe quel modèle standard à n'importe quel autre modèle standard:
<http://www.jbmballistics.com/cgi-bin/jbmgf-5.1.cgi>
- Demande à introduire la vitesse (parce que les points d'intersection de profils standards dépendent de la vitesse)
- Pour la conversion G1->G7 et les vitesses entre Mach 1.8 et 2.4, c'est le chiffre magique (et les autres conversions et vitesses sont d'un intérêt plutôt académique que pratique)

Réponse #2: BC G1 multiples

Certains fabricants de projectiles (notamment Sierra) publient plusieurs BC G1 pour les plages de vitesses différentes

Malgré la forme bizarre de la courbe qui se promène autour de la Vérité, les résultats sont tout à fait convaincants. Le modèle à multiples BC G1 a une précision tout à fait comparable au G7.

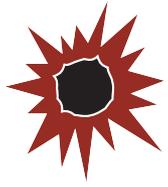


Réponse #3: pas de BC du tout

- Solution ultime: au lieu de se référer à un modèle standard "taille unique", utiliser les données spécifiques au projectile, obtenues par mesures radar Doppler
- Le projectile devient alors un standard en soi
- Pas un chiffre unique, mais un tableau de coefficients de traînée en fonction de valeur Mach, qui définissent la courbe réelle du projectile; peut apparaître dans un calculateur balistique uniquement si l'auteur de l'application le met dedans. Il suffit alors pour le tireur de choisir une option dans la liste pour contempler la Perfection

Profils de projectiles custom

- A présent (à ma connaissance) disponible pour les projectiles Lapua uniquement
- Hornady le fait aussi, mais ne publie pas la courbe en tant que telle, c'est uniquement dispo dans leur calculateur
- Bryan Litz teste aussi des projectiles, et fait aussi des courbes custom (un des fonds de son commerce). Ce ne sont toutefois pas des vraies mesures à radar Doppler, mais des mesures de temps de vol approximés par le standard G7. Litz affirme une "précision supérieure", mais à présent il n'y a pas eu de test indépendant pour vérifier la validité de ses courbes.



Les 3 pdi si G1 ne suffit pas

En résumé:

1.12: Utiliser G7, généralement suffisant bien dans le transsonique

1.13: Utiliser de multiples valeurs BC G1 (à peu près la même précision que G7), si le calculateur balistique comprend ce genre de combines

1.14: Tirer du Lapua, et ne pas se prendre la tête avec des modèles standard

Les bonnes nouvelles s'arrêtent là

... et l'impitoyable réalité nous montre son sourire sordide. 3 sourires sordides:

1. Le fabricant du projectile ment.
2. Le fabricant du projectile se trompe. Aussi, parfois, surtout pour des projectiles à pas cher, il peut y avoir une différence jusqu'à 5% de BC entre des lots de production différents.
3. Le fabricant ne publie pas de BC du tout.

Du faux BC

- Litz vs. chiffres "officiels" (rencontre brutale de la publicité avec la réalité)
- Même si on n'a pas besoin des "courbes custom" de Litz, il y a une leçon simple à retenir: les BC publiés ne sont pas toujours justes (**1.15**)
- Le tireur a donc besoin de préciser le BC tout seul comme un grand

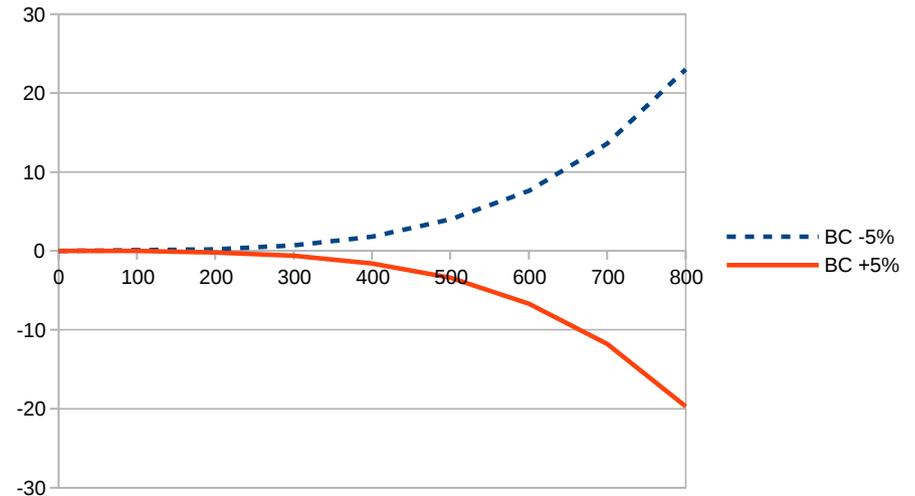


(c'est un pdi)

Qu'est-ce un BC "juste"?

- Distance? Applications?
- Chasseur gros gibier à courte distance? Sniper "sportif"? Chasseur varmint longue distance? etc.
- Chacun le détermine pour soi (calculatrice go!)
- Pour donner une idée:
 $\pm 5\%$ = erreur maximale,
 $\pm 2-3\%$ = précision désirée

(Lapua Scenar .308 167gr)



erreur de trajectoire en cm
avec $\pm 5\%$ de BC

Comment mesurer la valeur BC

- On dispose parfois de tables balistiques comprenant la vitesse et/ou le temps de vol à des distances différentes. Ok, à deux conditions:
 1. Distances d'au moins 300m (sinon la différence de vitesses n'est pas suffisamment prononcée pour une bonne précision)
 2. Atmosphère – pression et température – spécifiée (!) sinon l'erreur peut être trop grande
- (Tout dépend de la manière de construction les tables, mais) déterminer le BC à partir de vitesses est généralement plus précis qu'à partir de temps de vol
- Attention: pour rester dans les modèles standard, les vitesses doivent être largement supersoniques (de préférence > 450 m/s)
- Le reste du bonheur se trouve ici:
<http://jbmballistics.com/cgi-bin/jbmbcv-5.1.cgi> (par vitesse)
<http://jbmballistics.com/cgi-bin/jbmbct-5.1.cgi> (par temps)

Mesurer la vitesse soi-même

- (On va y revenir en détails dans un module dédié à la vitesse)
- Possible, à 300 m, mais:
 - Il faut un certain nombre de cartouches. Tout dépend de la qualité (variation de vitesse initiale), mais ça se compte généralement en dizaines.
 - Il faut être prêt à tuer. Tôt ou tard (et plutôt tôt que tard) le chronographe lointain mourra d'une blessure par balle.

Comment NE PAS mesurer la valeur BC

- Mesurer les corrections en élévation entre deux distances connues et essayer d'en déduire le BC
- La méthode simple, immédiatement disponible à un tireur-enthousiaste sans équipement spécial, mais...
- **... c'est du gaspillage total de munitions!**
- Et c'est aussi la raison de déceptions graves en cible, la source de plusieurs légendes autour du BC, et de toute sorte de théories de balistique fantastique, inventées en essayant de réconcilier la théorie et la pratique.

Pourquoi pas [mesurer le BC à partir de l'élévation]

- Explication par l'exemple
- K31 + GP11, canon plutôt précis (dispersion propre à 100m: 3cm sur une série de 5 coups en moyenne)
- Le point d'impact moyen est déterminé sur une série de 10 coups
- Dans ce cas, l'intervalle de confiance pour le point d'impact calculé à 100 m est de $\pm 7.2\text{mm}$
- La dispersion (et aussi l'intervalle de confiance) est grossièrement proportionnelle au temps de vol

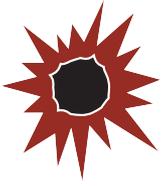
La science cruelle

Distance, m	Temps, s	IC 5, cm	IC 10, cm	IC 20, cm	BC $\pm 5\%$, cm
100	0.133	2.48	1.43	0.94	0.1
200	0.275	5.13	2.96	1.94	0.4
300	0.429	8.01	4.61	3.02	1.3
400	0.595	11.11	6.40	4.19	3.4
500	0.774	14.45	8.33	5.45	7.4
600	0.968	18.07	10.41	6.81	14.3
700	1.181	22.05	12.70	8.31	25.4
800	1.413	26.38	15.2	9.94	42.7
900	1.669	31.16	17.95	11.75	69.1
1000	1.951	36.43	20.99	13.73	108.1

IC – intervalles de confiance pour déterminer le point d'impact moyen sur des séries de 5, 10 et 20 coups respectivement. La colonne BC $\pm 5\%$ représente la différence de trajectoires avec une valeur BC de plus ou moins 5% – c'est la "fenêtre" où on veut rentrer avec nos mesures.

Et comme si ce n'était pas assez cruel

- Le tableau représente "le meilleur des cas", qui suppose que le point d'impact moyen est calculé avec toute précision scientifique, et que le zéroage est parfait
- Bonne chance pour essayer de le faire à 700 ou 800m, vu les facteurs "d'artillerie" qui rentrent en jeu
- Même si on suppose des conditions parfaites "de laboratoire", la précision nécessaire ($\pm 2-3\%$) ne vient que vers des distances qui frôlent le transsonique; confiance en modèles standards = ?
- Tirer plus de cartouches serait peu utile. Déterminer le point d'impact sur 40 cartouches au lieu de 10 ne réduit l'intervalle de confiance que de 2.18 fois. Par exemple, pour des résultats valables à 300m il faudrait tirer plus de 100 cartouches.



Une rafale finale de pdi

1.16: Il est possible de déterminer la valeur BC à partir d'une table balistique connue, à condition d'y avoir la vitesse et/ou le temps de vol sur au moins 300m de trajectoire en largement supersonique (vitesses de plus de 450 m/s), en conditions atmosphériques connues. Si disponible, privilégier les vitesses (plutôt que les temps de vol) pour calculer le BC; c'est plus précis.

1.17: Il est possible de déterminer le BC en mesurant soi-même la vitesse du projectile à 300m (et les conditions atmosphériques), mais c'est dangereux pour l'équipement et/ou complexe à mettre en place.

1.18: Il est complètement inutile d'essayer de déterminer le BC à partir de la différence d'élévation à des distances différentes. La dispersion propre même de très bons fusils ne permet pas de déterminer le point d'impact moyen avec assez de précision.

Pour changer, de bonnes nouvelles

- Les valeurs BC franchement fausses sont de plus en plus rares
- Un "faux" BC peut devenir juste quand vérifie le reste, à savoir:
 - La valeur de click de lunette
 - La hauteur de l'axe optique au-dessus de l'axe du canon
 - La vitesse initiale du projectile
 - La compréhension et la prise en compte de facteurs atmosphériques
- Dans les modules suivants, nous verrons tout ça, et bien d'autres choses encore.

Et pour finir, quelque chose d'utile

- Valeurs vérifiées (justes à ± 0.1 mrad près jusqu'à \sim Mach 1.0):
 - GP11 ordonnance: BC G7 = 0.276
 - GP90 ordonnance: BC G7 = 0.166
- Aucune différence décelable entre des lots différents