



CARACTERISATION DE LA PRECISION BALISTIQUE DU TIR EN BIATHLON.

INFO DOCUMENT :

Édité par le Département Sportif et Scientifique de la F.F.S
version : Février 2006

Groupe de travail : Jean Pierre Amat, Michel Tavernier.

Introduction

Le resserrement de la dispersion des performances internationales en biathlon rend la performance en tir plus importante qu'elle n'a jamais été. La réussite en tir des meilleurs biathlètes mondiaux s'établit autour de 88% (saison 2003/2004). Au cours de cette saison, 80% des athlètes ayant accédé aux podiums de la Coupe du Monde n'y serait pas parvenu avec un impact de plus hors de la cible.

La réussite d'un tir résulte de deux effets: la qualité du tireur et la précision du couple "carabine-cartouche". C'est ce deuxième point qui est traité dans ce document.

Les impacts produits à 50 mètres par une carabine fixée sur un support rigide ne se superposent pas parfaitement. Ils se distribuent, pour les meilleures cartouches, sur une surface qui varie de 2 à 7 cm² (7 cm² => diamètre de 30 mm). Cette dispersion des impacts pénalise les biathlètes, en réduisant la

tolérance des défauts d'alignement de la visée autrement dit leur marge d'erreur.

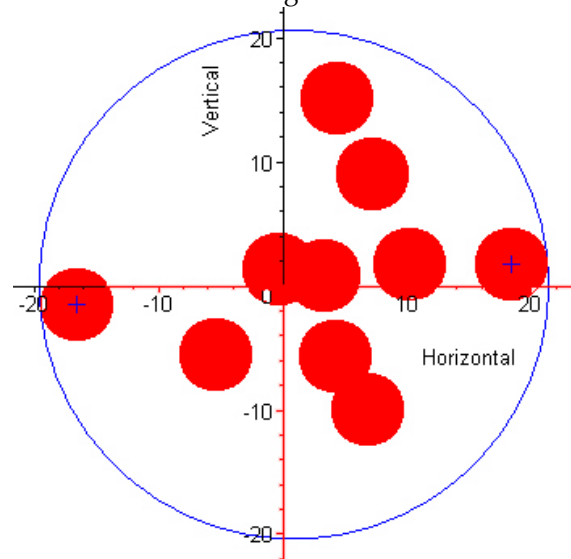


Figure 1: Exemple de distribution d'impacts sur une cible. Le cercle circonscrit aux impacts est en bleu (DCC=40 mm).



En tir couché, la tolérance de visée serait de ± 22.5 mm (rayon de la cible) pour un groupement parfait. Elle est réduite de moitié si les impacts se distribuent sur 7 cm^2 (cercle de 30 mm de diamètre). Cette dispersion des impacts ou groupement est généralement caractérisée par le diamètre du cercle circonscrit DCC aux impacts (Figure 1).

Ce diamètre varie en fonction du lot de cartouches, du canon et de la température ambiante.

I Validation de la notion de DCC

Plusieurs séries de 100 tirs (Figure 2) ont montré que la distribution expérimentale des impacts est isotrope (indépendance de la distribution des impacts en fonction de la direction)

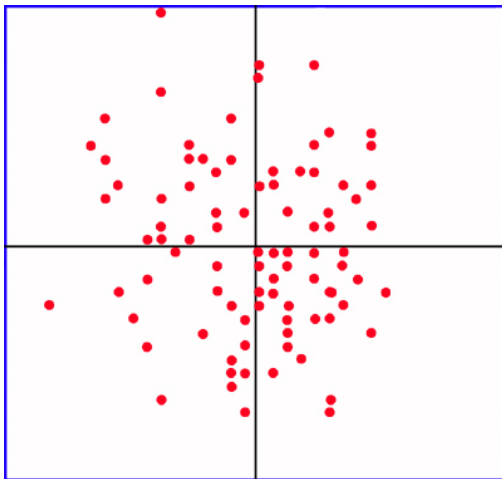


Figure 2: Distribution expérimentale des impacts de 100 tirs.

et uniforme (équiprobabilité le long du rayon) comme le montre la simulation présentée figure 3. D'autres simulations effectuées à partir de différentes lois statistiques donnent des résultats très différents des données expérimentales.

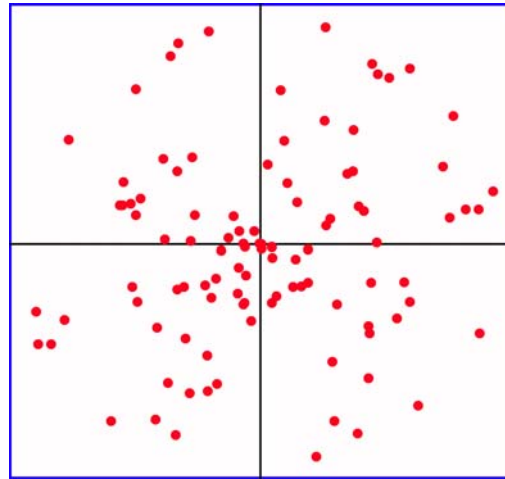


Figure 3: Simulation d'une distribution isotrope et uniforme de 100 tirs.

Pour sélectionner les "bons" lots de cartouches on ne peut procéder que par échantillonnage. Connaissant la loi de distribution des impacts, il est possible de simuler des tirs et d'estimer l'incertitude sur la valeur du DCC en fonction du nombre de tirs par essai.

Si le DCC nominal (valeur du DCC pour un nombre important d'impacts) est égal à 30mm la valeur mesurée DCCm à partir d'un nombre limité de tirs, est :

avec 5 tirs $\text{DCCm} = 22 \pm 8 \text{ mm à } 95\%$

avec 10 tirs $\text{DCCm} = 26 \pm 4 \text{ mm à } 95\%$

avec 20 tirs $\text{DCCm} = 28 \pm 2 \text{ mm à } 95\%$

Compte-tenu de l'isotropie de la distribution des impacts, il est important de prendre le DCC et non le petit diamètre de l'ellipse circonscrite aux impacts lorsque ceux-ci sont peu nombreux (figure 4). Certes le résultat est plus flatteur mais peu réaliste. Avec seulement 5 tirs l'excentricité ($e = \text{petit rayon}/\text{grand rayon}$) peut être très marquée. Elle est pratiquement égale à 1 avec des essais de 20 tirs. Avec des essais à 5 tirs le DCCm peut être 50% plus petit que le DCC.

Les essais réalisés régulièrement par la FFS en Angleterre comportent pour chaque couple "canon-cartouche", deux séries de 10 tirs. La dispersion moyenne des DCCm, de l'ordre de 4 mm, est conforme aux résultats des simulations.



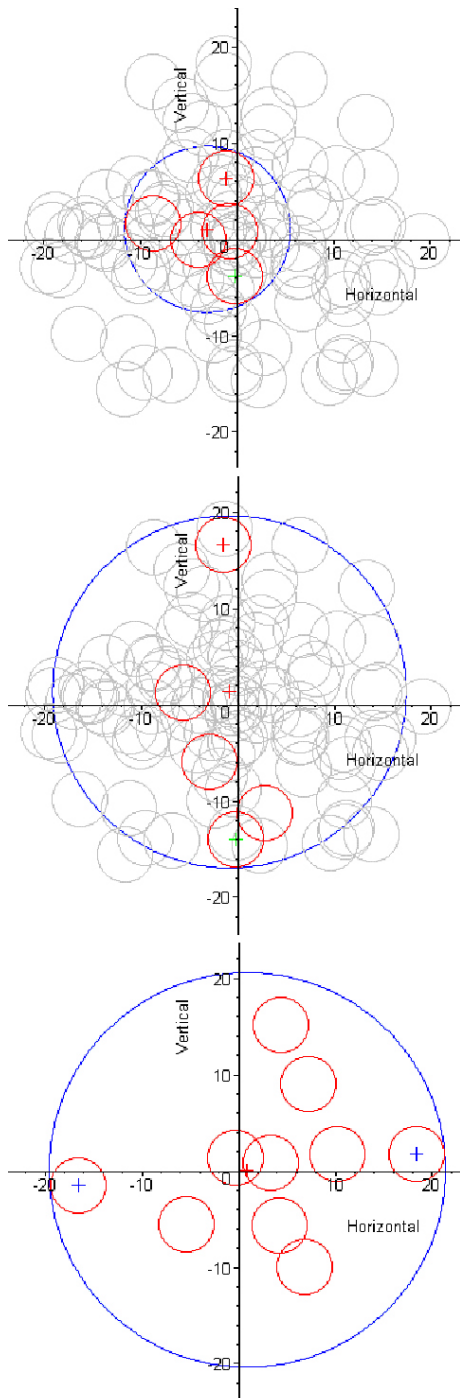


Figure 4: Distribution expérimentale d'impacts. Cas d'essais à 5 et 10 tirs. Pour 100 tirs le DCC est de 40 mm.

Les essais réalisés en collaboration avec l'Aérospatiale montrent que cette dispersion ne varie que légèrement avec la température :

- T = +20°C $\Delta DCC_m \approx 4.4$ mm
- T = -10°C $\Delta DCC_m \approx 4.6$ mm
- T = -20°C $\Delta DCC_m \approx 4.7$ mm

Lors des essais le problème est d'estimer le DCC à partir d'un nombre le plus limité possible de tirs. Pour des cartouches de compétition, un DCC de l'ordre de 20 mm peut être estimé par les relations suivantes :

$$\begin{aligned}
 DCC &\leq DCC_m (5 \text{ tirs}) + 6 \text{ mm} \\
 DCC &\leq DCC_m (10 \text{ tirs}) + 2 \text{ mm} \\
 DCC &\leq DCC_m (20 \text{ tirs}) + 1 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

Afin de disposer d'une précision suffisante sur l'estimation du DCC, il apparaît qu'il est nécessaire de réaliser des essais de groupement avec au moins 10 cartouches (Figure 4).

Le Diamètre du Cercle Circonsrit nominal correspond au DCC pour 100 tirs. Il constitue une limite raisonnable de la mesure expérimentale du DCC.

Lorsque le nombre de tirs est limité (5 tirs) la position du centre du DCC peut fluctuer. Cette variation correspond à un effet "statistique" qui n'a pas de signification physique. Elle disparaît lorsque le nombre de tirs par essai augmente.

Pour un DCC de 20 mm et un nombre de tirs par essai limité à 5, la distance moyenne entre les centres des cercles circonsrits partiels (EDCCCp) est de 2.3 mm, il tombe à 0.7 mm pour un nombre de tirs par essai de 20 (Figure 5).

Pour un DCC de 40 mm et un nombre de tirs par essai limité à 5, le EDCCCp est de 6.1 mm, il retombe à 2.8 mm pour un nombre de tirs par essai de 20.

DCC (mm)	20		40	
Nb tirs/essai	5	20	5	20
EDCCCp	2.3	0.7	6.1	2.8

Figure 5: Distance entre les Centres des Cercles Circonsrits partiels (EDCCCp) en fonction du DCC et du nombre de tirs par essai.

La distribution de la distance entre les impacts et leur barycentre évolue comme indiqué figure 6.

La distribution de la distance des impacts à leur barycentre présente bien, pour l'essentiel des tirs, une allure correspondant à une distribution uniforme (partie bleue de la figure 6) mais présente une fin de courbe "anormale" (partie rose de la figure 6).



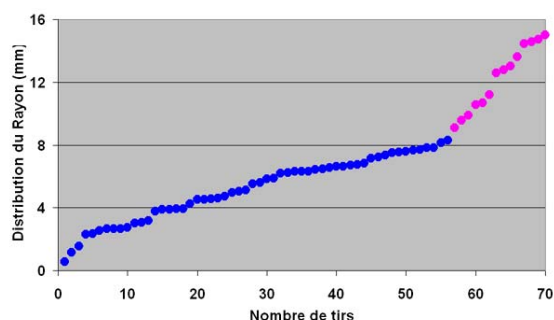


Figure 6: Distribution de la distance entre les impacts et leur barycentre.

L'importance de cette partie de courbe "anormale" (amplitude du DCC et nombre d'impacts) dépend du canon, des cartouches et de la température ambiante. Il conviendrait de pouvoir éliminer les cartouches susceptibles de générer ces impacts.

II Caractéristiques physiques d'une cartouche

Une cartouche est composée de 3 éléments dissociables : la balle, la poudre et l'étui. Un 4^{ème} élément est indissociable de l'étui : l'amorce. Enfin un élément additionnel est la graisse qui enduit la balle afin de faciliter et régulariser son passage dans le canon. La distribution de masse des composants de la cartouche est présentée figure 7. La masse totale et la distribution de masse des composants de la cartouche varient légèrement d'une marque à une autre (environ 1%).

Elément	Masse	Ecart type	Ecart max
Cartouche	3.3600	0.0070	0.0200
Balle	2.5930	0.0070	0.0200
Graisse	0.0025	0.0005	0.0010
Etui+amorce	0.6948	0.0015	0.0040
Poudre	0.0697	0.0007	0.0020

Figure 7: Masse et variation de masse des différents composants d'une cartouche (valeurs moyennes obtenues à partir d'un échantillon limité à 10 cartouches). La précision des mesures est de 0.0002 g.

Des essais ont été réalisés en remplaçant la graisse d'origine par différents types de graisse (bisulfure de molybdène, téflon, silicone). Aucune différence n'a été observée concernant la valeur du DCC en fonction de la nature de la graisse.

La dispersion de la masse totale de la cartouche représente 30% de la masse de la poudre. Aussi lors de la pesée d'une cartouche

intacte, il n'est pas possible d'estimer si une cartouche présente le risque d'un mauvais dosage de poudre (flyer).

III Influence de l'effet de Coriolis sur la trajectoire d'une balle.

La terre n'est pas un référentiel galiléen du fait de sa rotation autour du soleil et autour d'elle même.

La très faible variation de la vitesse de déplacement de la terre autour du soleil pendant une séance de tir rend cet effet négligeable.

La rotation de la terre sur elle même fait que la trajectoire de la balle n'est pas dans un plan vertical. La déviation latérale de la balle n'excède pas 0.5 mm. Toutes les balles subissent la même déviation et cet effet est pris en compte dans le réglage de la hausse.

IV Influence de la vitesse initiale de la balle sur la position de l'impact

Rappel : en biathlon, la distance de tir c'est à dire la distance entre la bouche du canon et la cible est de 50 m.

La vitesse de la balle à la sortie du canon est un élément essentiel qui détermine la trajectoire de la balle. A température ambiante (+20°C), cette vitesse initiale varie, d'un modèle de cartouche à un autre, de 290 à 380 m/s. Le règlement de l'IBU (International Biathlon Union) limite la vitesse maximale de la balle à la sortie du canon à 380 m/s. Cette vitesse initiale fluctue de façon sensible (± 5 m/s) pour un même modèle de cartouche.

La vitesse initiale d'une balle varie aussi de façon sensible avec la température:

$$\Delta V \approx 0.7 \text{ m/s/}^\circ\text{C}$$



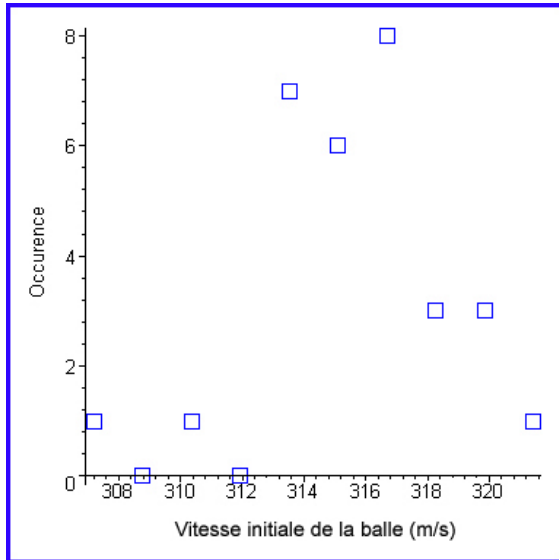


Figure 8: Distribution expérimentale, à -10°C , de la vitesse initiale de balles subsoniques. A cette température la vitesse du son est de 324 m/s.

Certaines cartouches ont une vitesse initiale supérieure à la vitesse du son (Figure 8 et 9) : la balle "claque" de manière caractéristique.

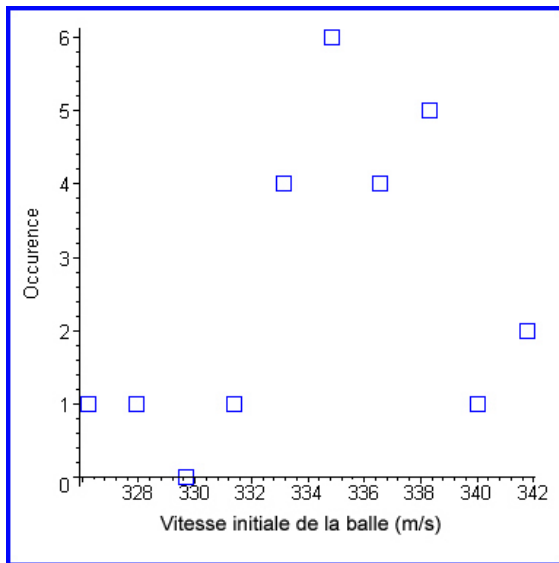


Figure 9: Distribution expérimentale, à 20°C , de la vitesse initiale de balles transsoniques.

La plupart des balles ont une vitesse initiale légèrement inférieure à la vitesse du son. De ce fait, dans certaines zones de la balle, la vitesse d'écoulement de l'air peut être supérieure à la vitesse du son. Ce régime transsonique présente la propriété de pouvoir générer des perturbations importantes dans l'écoulement et donc dans la trajectoire.

Il est à noter que la vitesse du son varie avec la température (Figure 10). Elle augmente approximativement de 0.5 m/s par degré Celsius.

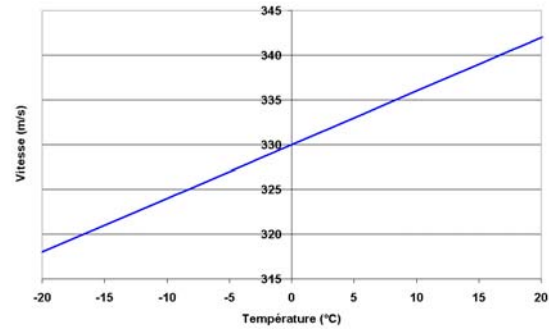


Figure 10: Variation de la vitesse du son en fonction de la température.

Au cours de sa phase aérienne, la balle est soumise à 2 forces, son poids et la force aérodynamique. Sa masse est connue :

$$2.60 \pm 0.01 \text{ g}$$

Au cours de ses 50 m de vol la balle perd de la vitesse (20 à 25 m/s, Figure 11).

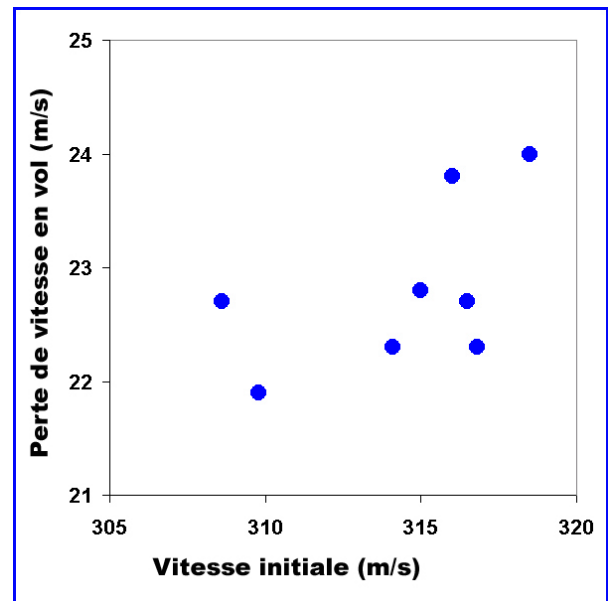


Figure 11: Perte de vitesse en vol pour des balles tirées à 20°C .

A partir de la perte de vitesse en vol, le coefficient de traînée aérodynamique SC_x d'une balle peut être estimé :

$$SC_x = 0.000\ 006 \text{ m}^2$$

Ce qui donne un coefficient de forme et d'état de surface:

$$C_x^* = 0.2$$

*Une voiture à un C_x de l'ordre de 0.3, un skieur un C_x qui varie de 0.2 à 0.5 selon sa posture.



Dans de telles conditions la durée du vol de la balle est de l'ordre de 0.16 à 0.18 s.

Sous l'effet de son poids, la balle est déviée vers le bas par rapport à l'axe du canon. Cette déviation est de l'ordre de 15 cm.

La dispersion (écart type) de la masse des cartouches d'un lot est de l'ordre de $\pm 0.5\%$ (Figure 7 et 12). Une variation de la masse de la balle de 1% entraîne une variation de la déviation de l'ordre de 0.2 mm. Cet effet peut être négligé dans sa contribution au groupement. A température ambiante et à -10°C il n'a pas été observé de corrélation entre la masse et la position des impacts.

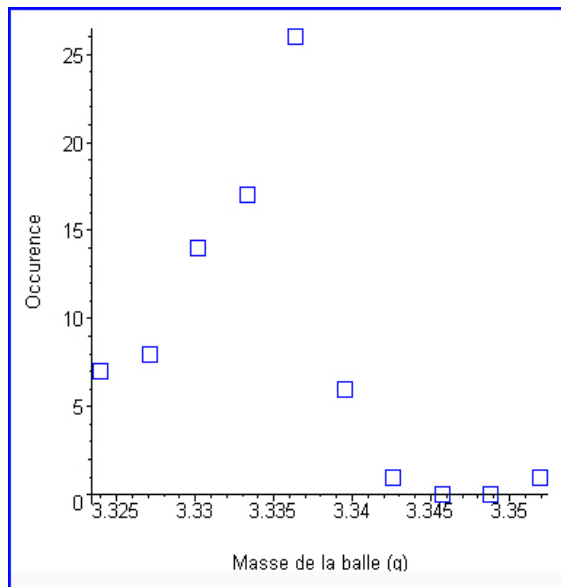


Figure 12: Distribution des masses d'un lot de 100 cartouches.

Une variation de la vitesse initiale entraîne une variation du temps de vol et de ce fait modifie la déviation verticale de la balle par rapport à l'axe de visée. Une variation de la vitesse initiale de 5 m/s entraîne une déviation verticale de 4 mm.

La distribution de la vitesse initiale est de type binomiale (Figure 8 et 9). Dans ces conditions, des simulations de séries de 10 et 20 tirs montrent que la fluctuation du DCC qui en résulte est faible et inférieure à celle induite par le nombre limité de tirs.

Les variations de masse et de vitesse initiale des balles devraient entraîner un groupement ellipsoïdal (grand axe vertical) mais la faible variation d'excentricité qui en résulte n'est pas observable dans les conditions d'essais pratiqués.

La traînée aérodynamique subie par la balle a une intensité de l'ordre de 0.3 Newton. Cette

intensité est environ 12 fois plus grande que celle de la force de pesanteur.

Une dissymétrie de la face antérieure de la balle (Figures 13 et 14) peut générer une force aérodynamique transversale très faible qui pourrait être une des causes de la taille du groupement. Cet effet devrait donner lieu à une dispersion isotrope.



Figure 13: Défauts locaux sur une balle.

A titre indicatif une force transversale égale à $5/1000^{\text{ème}}$ de la traînée aérodynamique induirait une déviation de la balle de 10 mm. Cette force correspond approximativement à celle produite par un coup de vent transversal de 5 m/s pendant toute la phase de vol.

L'effet de la force aérodynamique transverse due à un défaut de géométrie de la balle est quasiment annulé par la rotation de la balle sur elle-même. Le pas de l'hélice des rayures du canon étant de 15 pouces environ, la balle effectue environ 150 rotations sur elle-même pendant sa phase de vol.

Au moment de l'éjection, la balle peut avoir son grand axe d'inertie qui ne soit pas confondu avec la direction de la vitesse d'éjection (figure 15).

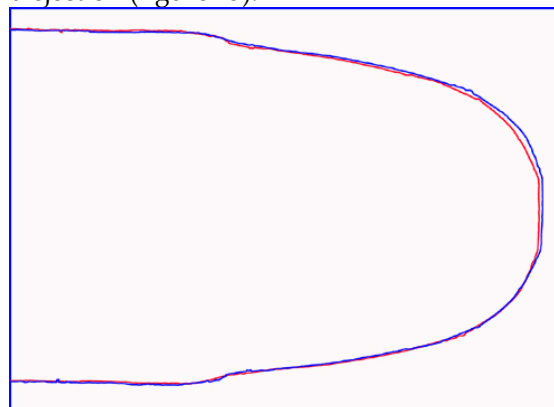


Figure 14: Défaut de symétrie observé sur une balle.



Plusieurs hypothèses peuvent être avancées pour expliquer la cause de ce décalage : défaut de fabrication interne ou externe de la balle, mauvaise introduction de la cartouche dans la chambre par le tireur, problème de guidage de la balle lors de son passage dans le canon ou à la bouche, inhomogénéité de la combustion de la poudre et/ou de la distribution des dépôts de résidus de combustion et de givre.

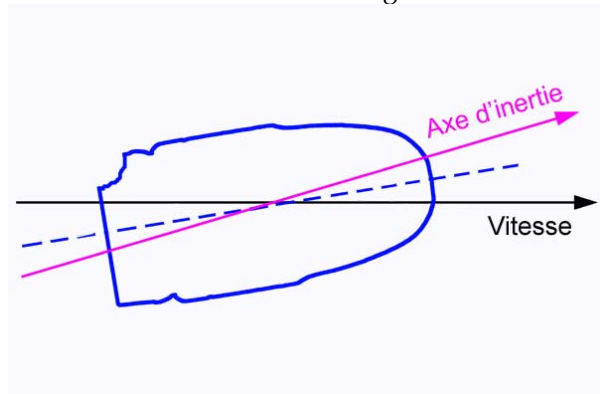


Figure 15: Décalage angulaire entre la vitesse initiale et l'axe d'inertie de la balle.

Ce défaut d'alignement de l'axe d'inertie par rapport à la vitesse initiale entraîne une déviation de la trajectoire qui est de l'ordre de 7 mm pour un désalignement de 0.1 degré (2/100^{ème} de mm sur la longueur de la balle). Ce défaut, quand il existe avant usage de la cartouche, est difficile à apprécier.

Le désalignement de l'axe d'inertie peut entraîner une force aérodynamique transversale qui n'est pas prise en compte dans cette estimation de la déviation de la balle.

Pendant le vol, l'orientation de l'axe d'inertie de la balle par rapport à sa vitesse présente une stabilité plus ou moins importante. Lorsqu'elle est stable cette direction est appelée: direction d'équilibre dynamique d'Esclançon.

A titre indicatif un méplat effectué sur une série de balles (Figure 16) génère une augmentation du DCC de l'ordre de 40%. Un méplat sur la partie cylindrique de la balle donne une augmentation un peu plus faible du DCC.



Figure 16: Méplat réalisé sur une série de balles.

Les essais ne permettent pas de conclure si l'augmentation du DCC résulte d'un effet aérodynamique, ou du désalignement de l'axe d'inertie avec la vitesse, ou des deux.

Des essais réalisés en ayant maltraité les cartouches (désalignement visible de l'étui et de la balle) conduisent à un DCC qui n'est pas significativement différent de ceux obtenus lors d'essais de référence.

V Influences de la température et de l'appariement "carabine/cartouche" sur le groupement.

La température ambiante va influencer entre autres le "serrage canon-balle".

Les coefficients de dilatation de l'acier λ_{Fe} et du plomb λ_{Pb} sont respectivement de l'ordre de:

$$\lambda_{Fe} \approx 10.2 \times 10^{-3} \text{ mm.m}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$$

$$\lambda_{Pb} \approx 29.5 \times 10^{-3} \text{ mm.m}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$$

Entre 20°C et -20°C les diamètres de 2 objets en acier et en plomb varient relativement de 5 μm pour un diamètre initial de 6 mm. La variabilité du diamètre de la balle, due aux procédures de fabrication, est 2 à 4 fois plus importante. Une diminution de température induit un serrage moins important de la balle dans le canon. Cet effet peut expliquer, pour une part, la baisse de vitesse initiale de la balle lorsque la température diminue. Il convient de rappeler que cette vitesse initiale varie en moyenne d'environ 0.7 m/s par °C.

La vitesse initiale varie en fonction de la température et du couple "canon-cartouche" (Figure 17).



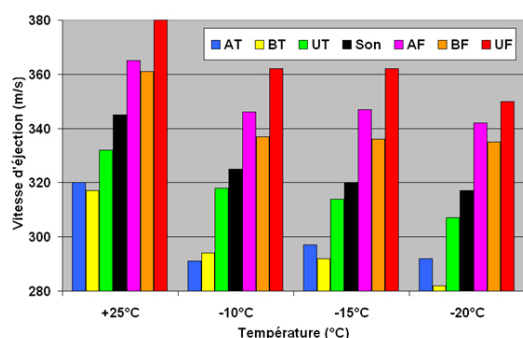


Figure 17: Vitesse initiale des balles en fonction de la température pour 6 couples "canon-cartouche" (3 canons A, B, U et 2 lots de cartouches (F, T). En noir : la vitesse du son.

La vitesse initiale diminue avec la température que les balles soient subsoniques (T) ou supersoniques (F).

En prenant le canon A comme référence, le canon B donne une vitesse initiale plus faible de 6 m/s et le canon U une vitesse plus grande de 15 m/s.

Le DCC varie très sensiblement en fonction du couple "canon-cartouche". Cet effet ne peut pas être imputé qu'à la qualité de fabrication des cartouches. Il résulte, entre autre, de la façon dont la balle "s'accommode" des imperfections du canon tout au long de son passage dans celui-ci (chambre, canon, bouche). La qualité des couples "canon-cartouche" dépend de la précision relative des 2 éléments et peut être particulièrement sensible à la température (Figure 18).

A température ambiante, les cartouches d'un même lot donnent des DCC très différents avec des canons différents. Un même canon donne des DCC différents avec des cartouches de lots différents.

Cet effet peut être accentué avec la température.

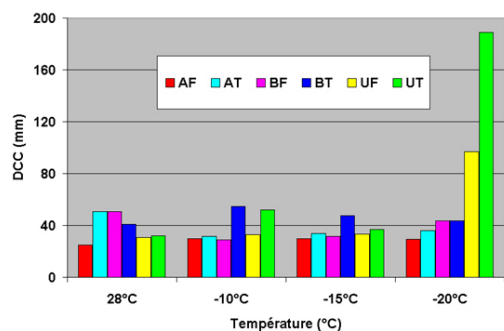


Figure 18: DCC moyens (2 séries de 20 tirs) pour 6 couples obtenus à partir de 3 carabines (A,B,U) et de 2 lots de cartouches (F,T) à 4 températures.

Pour un couple "canon-cartouche" donné le DCC augmente quand la température diminue. Cette augmentation qui peut être de l'ordre de 10 à 30% pour une température variant de 20 à -10°C peut devenir inacceptable pour certains couples "canon/cartouche" (couples 6 et 7 de la figure 19).

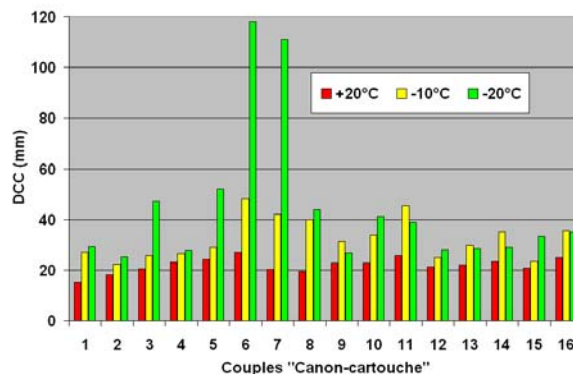


Figure 19: Exemples de variations du DCC en fonction de la température pour différents couples "canon-cartouche" constitués à partir de 10 canons et 5 lots de cartouches (1998).

Cependant cette tendance générale souffre d'exceptions. Certains couples "canon-cartouche" deviennent relativement plus performants à basse température qu'à température ambiante (couple 2 Figure 19).

Remarque:

Les positions des impacts des tirs des figures 17 et 18 ont été enregistrées à l'aide d'une cible électronique. Il a donc été possible de regrouper les 240 tirs par séries de 5 et par série de 20. Les résultats des DCC moyens ainsi obtenus sont:

$$DCC_m (5 tirs) \approx 36 \text{ mm}$$

$$DCC_m (20 tirs) \approx 46 \text{ mm}$$

Ces résultats sont en parfait accord avec les résultats du chapitre I.

VI Conclusions

Les causes de dispersion des impacts sont nombreuses. Malgré les progrès réalisés dans les procédures de fabrication, il reste des défauts qui seront de plus en plus difficilement décelables par un contrôle non destructif. Il sera difficile d'imposer aux fabricants des contraintes plus importantes sur les procédures de fabrication sans une augmentation sensible du prix de revient d'une cartouche.

En tout état de cause, il apparaît que le choix des couples "canon-cartouche" reste l'élément essentiel dans l'optimisation de la performance



du tir. Cette sélection doit prendre en compte la température ambiante.

Un contrôle de la masse des cartouches peut permettre d'éliminer les éventuelles cartouches sans poudre. Il semble que ce phénomène soit bien géré par les fabricants. L'élimination des balles qui ont des défauts de distribution de leur masse et qui ont des "marques" ou des dissymétries visibles (effet aérodynamique important) devrait permettre de resserrer légèrement les valeurs des DCC.

Un soin particulier dans le stockage, le transport et la manipulation (introduction de la cartouche dans la culasse) devrait limiter les causes qui peuvent générer ces défauts.

Des observations à l'endoscope (Figure 20) mettent en évidence des "défauts d'état de surface" à l'intérieur du canon. Ceux-ci pourraient occasionner des "perturbations" non symétriques qui pourraient augmenter le DCC. Le serrage "canon-balle", plus faible à basse température, pourrait amplifier cet effet. Cette hypothèse est à vérifier.

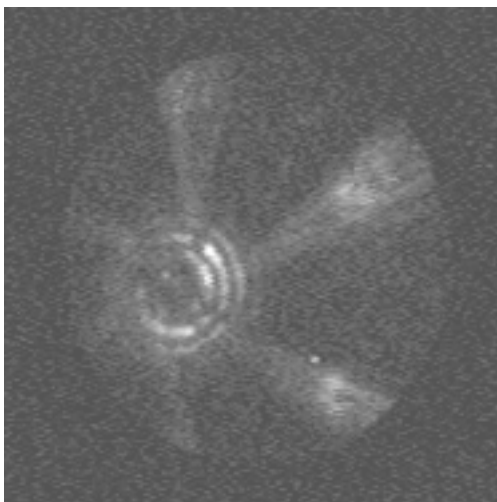


Figure 20: Image de l'intérieur d'un canon. Les rayures présentent des aspects irréguliers.

Il convient de différencier ces défauts de canons avec des dépôts de combustion consécutifs aux tirs (Figure 21).

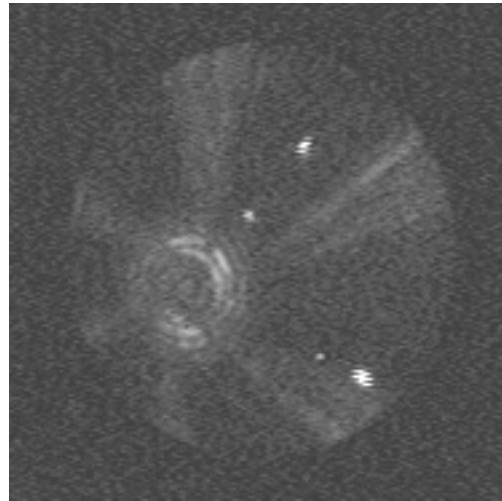


Figure 21: Image de l'intérieur d'un canon. Les points blancs correspondent à des dépôts de combustion.

L'augmentation du DCC à basse température pourrait s'expliquer, en partie, par la présence inhomogène de givre dans le canon et plus particulièrement au niveau de la bouche du canon qui favoriserait le désalignement de l'axe d'inertie de la balle. Les "défauts d'état de surface" à l'intérieur du canon pourraient favoriser cette formation inhomogène de givre. Il est clair qu'une analyse dimensionnelle précise de la balle et du canon permettrait d'établir les corrélations "dimensions-DCC" nécessaires à l'optimisation du choix des couples "canon-cartouche".

La mise en service du stand de tir thermostaté du CNSN de Prémanon devrait permettre de commencer à répondre à une partie de ce problème.

De même ce nouveau dispositif expérimental devrait permettre de connaître les contributions relatives des effets "aérodynamique" et "Esclangon" dans la valeur du DCC et de ce fait améliorer le choix des critères de tri.

Les résultats présentés dans ce document ont été obtenus dans le cadre d'une collaboration entre la FFS et l'Aérospatiale (1995-1998) qui a bénéficié du soutien du Ministère de la Jeunesse et des Sports.

Ont participé à ces essais:

Pour l'Aérospatiale:

Balès, Bouet, Frolich, Lacaille, Vachet

Pour la FFS:

Amat, Besson, Boget, Coulmy, Etienne, Epp, Giachino, Guyot, Mougel, Ruby, Tavernier, Tessier, Vassalo.



Les auteurs remercient:

Mr Olivier Bonneau (LMS UMR 6610, Poitiers) pour son aide déterminante dans la rédaction de ce travail.

Mr Pierre Letellier (UPMC) pour son assistance technique dans la réalisation de certains essais.

Bibliographie

Bellet Didier. Problèmes de mécanique des solides. Editions CEPADEUS, mars 1989.

Dietrich Frank. Thèse 2003 Poitiers.

Les comptes rendus détaillés des essais réalisés en collaboration avec l'aérospatiale (1995 à 1998) sont consultables à la FFS

Toutes les références citées dans ce document sont disponibles auprès du Département Sportif et Scientifique de la FFS.

INFORMATION :

Les documents « DTN infos » édités par le Département Sportif et Scientifique sont disponibles en téléchargement sur le site de la F.F.S : <http://www.ffs.fr/>.

Pour plus d'informations :
Nicolas Coulmy (nicolas.coulmy@ffs.fr)

*Fédération Française de Ski
Département Sportif et Scientifique
50 rue des Marquisats
BP 2451
74011 ANNECY cedex*

Toute reproduction, même partielle de ce document est interdite sans autorisation du DSS de la Fédération Française de Ski.

