

Peut-on « faire flèche de tout bois » sous prétexte d'expérimentation balistique ?

Christian LEPERS

RÉSUMÉ

Les expérimentations balistiques présentées dans cet article avaient pour but d'étudier le comportement de flèches et d'arcs de caractéristiques différentes. Les mesures d'énergie cinétique effectuées en cours du vol des différentes flèches révèlent des comportements très variables selon les empennages équipant les projectiles. Ces expérimentations montrent aussi l'influence que les caractéristiques propres des arcs peuvent avoir sur le vol des projectiles. Ces expérimentations démontrent l'importance du choix raisonné des types d'arc et de projectiles utilisés lors d'expérimentations balistiques et la nécessité de bien maîtriser les principes physiques qui régissent ces armes.

MOTS-CLÉS : expérimentation balistique, arc, flèche, empennage, énergie cinétique des projectiles.

ABSTRACT

The ballistic experimentations described in this paper were made in the aim of studying different arrow and bow behaviours. Measurements of kinetic power made along the trajectories of different arrows have shown complex behaviour very unsettled according to the feathering of the arrows. These experimentations have shown the influence that bow characteristics have on arrow flights. These experimentations demonstrate the necessity of an intelligent choice of bow and arrow model for all ballistic experimentations and the necessity to master physical laws ruling these weapons.

KEYWORDS: ballistic experimentation, bow, arrow, feathering, kinetic power of missile.

Introduction

Des arcs et des flèches sont régulièrement utilisés pour tester l'efficacité d'armatures en silex lors de nombreuses expérimentations (Albarello, 1986 ; Cattelain *et al.*, 1995 ; Fischer *et al.*, 1981 & 1984 ; Grimaldi, 2009 ; Hutching, 2011 ; Sisk *et al.*, 2009 ; Waguespack *et al.*, 2009 ; Weber, 2009). Les comptes rendus de beaucoup de ces expérimentations m'interpellent. Mes remarques se fondent sur mon expérience pratique du tir, de la facture d'arcs « primitifs », d'observations de tir avec des arcs très différents et de la lecture d'ouvrages techniques sur le sujet. Elles portent tantôt sur la manière dont sont sélectionnés et utilisés les arcs et les flèches, tantôt sur l'absence de données concernant les critères de sélection du matériel, ou encore sur le choix de certains expérimentateurs d'associer des types de projectiles et d'arcs totalement incompatibles d'un point de vue technique autant qu'historique (Waguespack *et al.*, 2009 : 792 ; Hutching, 2011 : 1741). Vu l'aspect subjectif de mon expérience et les critiques, en grande partie intuitives, que je porte sur ces travaux, il m'a semblé utile de mener quelques expérimenta-

tions afin de disposer de valeurs chiffrées plus objectives. Les résultats purement balistiques présentés ci-dessous doivent sans doute être affinés, mais ils peuvent déjà être utilisés pour nourrir des réflexions et orienter de futures expérimentations.

Deux expérimentations distinctes ont été réalisées : la première cherchait à quantifier les qualités balistiques de flèches semblables, munies d'empennages différents et tirées avec un même arc dans des conditions constantes. La seconde cherchait à comparer les caractéristiques de vol de flèches identiques lancées, dans les mêmes conditions d'armement, à l'aide d'arcs différents.

Par tradition, les archers utilisent des unités anglo-saxonnes (livres [*lbs* ou #] et pouces ["]) pour définir leur matériel. Pour la facilité de compréhension, je conserverai les unités anglo-saxonnes pour caractériser les arcs et les flèches, mais les données essentielles à la compréhension des expérimentations seront exprimées en unités du système international (mètre [m], mètre par seconde [m/s], newton [N] et joules [J]), plus faciles d'usage pour les divers calculs.

1. Quelques rappels sur l'arc et les flèches

Les données essentielles à prendre en compte pour appréhender le fonctionnement d'un arc et d'une flèche ont déjà été détaillées dans de précédents articles (Lepers, 2005 et 2011). Je me contenterai donc de rappeler de manière succincte les points essentiels à la compréhension des expérimentations réalisées. Outre les références reprises en bibliographie, les lecteurs désireux d'étoffer leurs connaissances sur le sujet pourront se plonger dans les nombreux dossiers et livres relatifs à l'archerie sportive actuelle, en restant vigilants dans la transposition des pratiques actuelles à des fins expérimentales. Depuis 60 ans, le développement de l'ingénierie et l'arrivée des matériaux de synthèse dans les équipements sportifs ont amené une évolution très rapide du matériel et des techniques de tir. Il y a aujourd'hui une rupture technique et matérielle plus nette entre un archer de 2015 et ceux d'il y a 100 ans, qu'entre ceux-ci et les archers de la préhistoire. Parallèlement à cette évolution technologique, on constate depuis deux décennies le retour d'un certain engouement pour l'archerie originelle, plus proche des pratiques anciennes (arcs exclusivement réalisés en matériaux naturels) et souvent dite « archerie primitive ». Il est donc paradoxalement plus facile de s'approcher des standards de l'archerie préhistorique aujourd'hui qu'il y a 20 ans.

1.1. L'arc

Un arc est un ressort qui accumule de l'énergie potentielle lors de son armement (Lepers, 2011). L'énergie accumulée dépend de la force de l'arc et de l'extension qu'on lui inflige (\pm l'allonge du tireur). Les archers ont l'habitude de quantifier leurs arcs en précisant la force (en livres) développée à leur allonge (en pouces). Ces données sont souvent inscrites par le fabricant sur la branche inférieure de l'arc pour faciliter la sélection d'un matériel adapté à la force et à la morphologie de l'archer, mais elles ne reflètent aucunement les capacités réelles de l'arme.

L'arc ne se révèle que lors du tir, une fraction de l'énergie théorique stockée pendant l'armement étant consommée par l'arc lui-même, et indisponible pour la flèche. La flèche elle-même, en fonction de ses caractéristiques propres, en « absorbera » une quantité variable. La mesure de l'énergie de la flèche lors de son départ donnera une indication plus juste de la performance du tandem arc-flèche. Mais la mesure essentielle pour juger des dégâts infligés à la cible ou à l'armature sera l'énergie cinétique de la flèche au moment de l'impact.

1.2. La flèche

Les divers éléments constituant la flèche et le soin apporté à sa fabrication influencent ses qualités balistiques. En vol, elle décrit une trajectoire parabolique complexe (Lepers, 2011 : 111). Armé à une même allonge un arc donné donnera toujours au projectile une énergie constante. Selon les projectiles, cette énergie ne sera pas dépensée de la même manière. Seule l'énergie qui contribue à propulser la flèche en droite ligne vers le but peut être considérée comme l'énergie utile du projectile. Sa valeur sera toujours inférieure à la quantité d'énergie reçue de l'arc. La différence entre ces deux valeurs est fonction de nombreux paramètres :

- la manière dont cette énergie est transmise au projectile ;
- la masse, la taille et la forme du projectile ;
- la souplesse du projectile ;
- les interactions subies par ce projectile avec le milieu dans lequel il se déplace (essentiellement la gravité et les frottements).

Outre les frottements, sa vitesse initiale dépendra de sa masse et de l'énergie reçue de l'arc selon la formule :

$$v = \sqrt{2e_{cin} / m}$$

(Formule dérivée de l'équation de l'énergie cinétique : $e_{cin} = \frac{1}{2} m.v^2$,

avec e_{cin} : énergie cinétique en joules [J], m : la masse en kg,

v : la vitesse en m/s) (Benson, 2004 : 195)

Même si cela se marque davantage pour des différences de masse importantes, pour une même quantité d'énergie reçue, un projectile léger aura une vitesse initiale plus importante et volera selon une parabole plus plate qu'un projectile lourd dont la vitesse sera plus faible. Par contre, une flèche trop légère ne bénéficiera pas d'un transfert d'énergie optimal par manque d'inertie (la notion d'inertie est liée à la notion de masse). « L'inertie d'un corps est sa tendance à résister à toute variation de son état de mouvement. Autrement dit, un objet a tendance à rester au repos s'il est au repos et à rester en mouvement, à vitesse constante, s'il est en mouvement » (Benson, 2004 : 82). Une faible inertie entraîne une diminution plus rapide de la vitesse d'un objet en mouvement. À l'impact, une flèche légère disposera d'une énergie moindre qu'un projectile plus lourd mais plus lent. L'optimum balistique résultera d'un compromis entre les capacités du matériel et les buts recherchés.

La vitesse et l'énergie initiales (acquises par la flèche lors de la phase de propulsion) vont diminuer pendant le vol en fonction de ses caractéristiques propres (*spine*, forme, surface d'empennage, frottements de l'air, répartition des masses, etc.) ainsi que de la distance de tir. L'énergie finale, lors de l'impact, sera toujours inférieure à son énergie initiale. Outre les données évidentes (masse, taille, dimensions des empennages), certaines caractéristiques plus discrètes du projectile ont une influence prépondérante sur son vol et donc sur la quantité d'énergie dont elle disposera à l'impact.

1.2.1. Le *spine* et le paradoxe de la flèche

Lors de la décoche, la poussée de la corde sur l'encoche engendre la flexion du fût (Frédéric, 1985 : 68 ; Greenland, 2000 : 10). Par réaction, la flèche va se redresser et prendre une flexion en direction opposée mais de moindre amplitude. Ces flexions parasites vont décroître et finalement le projectile, complètement redressé, prendra une direction parallèle à sa trajectoire théorique. Imperceptible à l'œil, ce vol zigzagant est appelé « paradoxe de l'archer ». En général, il est plus important avec les arcs traditionnels que pour les arcs actuels et s'explique par l'action combinée de nombreux facteurs :

- le fait que l'impulsion de l'arc soit donnée sur le talon de la flèche, loin en arrière de son centre de gravité ;
- les caractéristiques propres du fût : sa nature (bois, aluminium...), sa longueur et sa souplesse qui s'associent pour former le *spine* statique) ;
- l'énergie transmise à la flèche par l'arc (plus elle sera importante, plus la flexion de la flèche sera accentuée) ;
- la distance durant laquelle la flèche sera soumise à la poussée de la corde (l'allonge du tireur) ;
- l'angle formé par la flèche et la direction de poussée de la corde (Frédéric, 1985 : 71 ; Greenland, 2000 : 11). Notons que les arcs actuels possèdent une fenêtre permettant de rapprocher la trajectoire de sortie de la flèche de la direction de poussée de la corde ;
- les frottements subis par la flèche, en contact avec la main et la joue d'arc. Sur les arcs modernes, ce point de frottement est minimisé par l'usage d'un « repose flèche » et d'un bouton écarteur (Frédéric, 1985 : 68) ;
- la présence ou l'absence d'empennage, sa disposition et sa surface ;
- la masse de la pointe, qui peut avoir un effet significatif sur l'ampleur de la flexion du fût (Frédéric, 1985 : 75).

Tous ces paramètres s'influencent l'un l'autre et constituent ensemble ce qu'on appelle le « *spine* dynamique » du projectile. En pratique, ces flexions absorbent une partie de l'énergie du projectile et compliquent l'ajustement du tir. Comme il est impossible de les éliminer complètement il est dans l'intérêt du tireur de les minimiser en veillant à l'adéquation étroite des flèches et de l'arc qui les propulse.

1.2.2. Empennage

En général, une flèche est munie d'un empennage qui contribue à redresser le projectile et à améliorer sa précision. Classiquement, une flèche est équipée de 3 pennes (demi-plumes) placées radialement à 120° l'une de l'autre, à quelques centimètres de l'encoche. Mais d'autres matériaux, combinaisons et types de

montages sont attestés par l'ethnographie. La taille de l'empennage, sa surface et sa disposition sur le fût auront une très grande influence sur la capacité de la flèche à se redresser, sur sa précision, sa vitesse (Frédéric, 1985 : 70 ; Greenland, 2000 : 40) et donc, sur son énergie.

Pour les expérimentations envisagées, j'ai utilisé des plumes naturelles de 2 types : les premières, prêtes à l'usage, de forme parabolique et de longueur variable, et les secondes, dites « fluflu ». Ces dernières sont des plumes naturelles de grande taille (non retaillées) je les ai découpées selon la longueur et la forme de l'empennage choisi. Deux flèches ont été munies d'empennages synthétiques, communément appelés vanes.

Toutes les plumes naturelles présentent une courbure spécifique selon leur provenance (aile gauche ou droite de l'oiseau), et des rugosités différentes sur chacune de leurs faces (la face la plus lisse se trouve sur le côté extérieur de l'aile, tandis que la face interne, soumise au frottement contre les autres plumes, est plus rugueuse) (Greenland, 2000 : 40). En vol, la différence de frottement induite par chacune des faces des plumes de l'empennage entraîne la rotation du projectile, ce qui contribue à sa stabilisation et à sa précision. Pour un vol correct, une flèche doit être équipée de plumes provenant d'une même aile (gauche ou droite). En général, on redresse les plumes lors de leur fixation sur la flèche (empennage droit). Dans certains cas, elles sont montées en gardant leur courbure naturelle (montage dit « compensé » ou « *offset* »), ou en accentuant cette courbure (empennage hélicoïdal). Certains auteurs précisent que ces montages augmentent la vitesse de rotation et la précision de la flèche, au détriment de sa vitesse (Greenland, 2000 : 40).

1.2.3. Équilibre des projectiles

Ce paramètre a été mesuré lors de la fabrication des projectiles mais ne présente pas d'intérêt pour les expérimentations présentées dans cet article (les masses de toutes les pointes étant identiques ou très proches). Rappelons que, pour un vol régulier, le point d'équilibre du projectile doit se situer en avant de son centre géométrique, idéalement entre 35 et 40 % de sa longueur depuis la pointe du projectile (Frédéric, 1985 : 71).

2. Matériel utilisé et protocole expérimental

2.1. Les arcs (fig. 1 et 2)

Trois arcs ont été choisis en fonction de leur *design* et de leur type de construction : ce sont des arcs droits, comme la majorité des arcs préhistoriques connus. De morphologie proche, ils ont un fonctionnement physique identique, ce qui n'est pas le cas des arcs *recurves* ou des arcs à poulies, par exemple (Baker, 1992 ; Lepers, 2005 : 20) :

- un arc en orme (*Ulmus*), d'un standard proche des arcs préhistoriques, dit simple ou primitif. J'utilise cet arc de type *flat-bow* régulièrement depuis plus de quatre ans. Des tests, réalisés en 2012 pour une précédente expérimentation (Lepers, 2012), et les mesures effectuées pour les expérimentations présentées ci-dessous montrent un comportement constant (cf. tab. 1 : mesures effectuées le 24/03/2012 et le 22/02/2015) ;
- un arc en if (*Taxus Baccata*) de type *long-bow* (Lepers, 2005). Entrant également dans la catégorie des arcs simples, cet arc est en usage depuis dix ans ;
- un arc dit « traditionnel », de fabrication moderne, réalisé en lamellé collé bois-fibre de verre. Désigné dans cet article sous le nom « Merlin », il a été réalisé par un artisan renommé, aujourd'hui décédé. Constitué d'une âme en bois prise en sandwich entre deux bandes de fibres de verre, il est typique des arcs de construction actuelle. Par abus de langage et par comparaison avec les autres types d'arcs modernes équipés d'accessoires, ce genre d'arc est couramment appelé « arc traditionnel ».

Les forces développées par ces arcs à différentes allonges sont reprises dans le tableau 1. Les deux premiers arcs sont équipés de cordes en lin, le troisième d'une corde en fibre synthétiques (dacron).

Des vitesses de sortie de flèche de l'ordre de 45 à 60 m/s me semblent représentatives d'arcs traditionnels primitifs (nous verrons plus loin ce qu'il faut penser de ce paramètre). Sachant que certains arcs à poulies



FIG. 1 – Deux des arcs utilisés pour les expérimentations.
À gauche, l'arc « Merlin » (1) ;
à droite, l'arc en orme « flatbow 1001 » (2),
réalisé par l'auteur.



FIG. 2 – Le troisième arc « longbow if 2005 » (3)
utilisé pour les expérimentations
(arc en if fabriqué par l'auteur).

Arc	<i>Flatbow 1001</i> (24/03/2012)	<i>Flatbow 1001</i> (22/02/2015)	<i>Longbow if 2005</i>	Merlin
Allonge (")	Force (lbs)	Force (lbs)	Force (lbs)	Force (lbs)
15	17	17	19,5	18
20	22	26	30,1	26
23,5		34	38,1	34
25	37	37	41,8	36,5
27		42	46,7	40,5
29	47	47	53,0	

TAB. 1 – Force de traction nécessaire, à des allonges croissantes, pour tendre les arcs utilisés pour les expérimentations. Les deux premières colonnes reprennent les valeurs mesurées pour l'arc « flatbow 1001 », à des dates différentes.

actuels (données catalogue 2015) permettent des vitesses de sortie de flèches supérieures à 300 pieds/s (soit plus de 100 m/s), les résultats obtenus peuvent être très différents !

Les deux premiers arcs (qui présentent des *designs* différents) ont été réalisés par mes soins à partir d'essences différentes et sont équipés de cordes en lin. Le troisième, équipé d'une corde en fibres synthétiques, m'a été prêté par un ami pour l'expérimentation. Les caractéristiques de force/allonge de ces arcs sont présentées dans le tableau 1. On notera qu'à l'allonge de 23,5 pouces (0,6 m), le *flat-bow* en orme et l'arc Merlin nécessitent tous deux la même force de traction.

2.2. Les flèches

2.2.1. Expérimentation sur l'influence de l'empennage (fig. 3)

Pour cette expérimentation, les flèches ont été réalisées à partir de fûts en bois (cèdre de Port Orford [POC]), de plumes naturelles de forme parabolique (sauf deux flèches empennées de vanes), de pointes métalliques de 125 grains ($\pm 8,15$ g), dans le but d'avoir des flèches de caractéristiques proches hormis l'empennage. L'encoche de chaque flèche a été taillée dans l'épaisseur du fût. La masse des flèches et le *spine* des fûts ont été mesurés avant la pose des plumes, afin de pouvoir les apparier au mieux de leur variabilité selon les empennages testés. L'arrière des empennages a été positionné à 3 cm de l'extrémité proximale de la flèche. La fixation des empennages des flèches équipées de plumes naturelles de 2-1/2, 4, 5 et 8 pouces, a été renforcée par une ligature en spirale insérée entre les barbes des plumes.

2.2.1.1. Répartition des flèches selon les types d'empennages

- deux flèches ont été laissées sans empennage (n° 4 et 15) (fig. 8) ;
- cinq flèches ont été montées avec 3 plumes naturelles collées radialement, parallèlement à l'axe de la flèche (empennage droit) : une avec des plumes de 2-1/2 pouces (n° 12), une avec des plumes de 4 pouces (n° 2), une avec des plumes de 5 pouces (n° 9), une avec



FIG. 3 – Les différents types de plumes et vanes utilisés pour les expérimentations.

À gauche, de haut en bas : une plume « fluflu » complète, plume de 8 pouces découpée à partir d'une plume « fluflu », plume « fluflu » de 5 pouces, plume parabolique de 5 pouces, plume parabolique de 4 pouces, plume parabolique de 2-1/2 pouces. À droite : vane de 4-3/4 pouces et vane de 2-7/8 pouces. On notera la courbure des plumes naturelles.

des plumes de 8 pouces (n° 6) et une avec des plumes de 5 pouces obtenues à partir de plumes fluflu (n° 3). Ce dernier projectile peut également entrer dans la catégorie des empennages très freinants (fig. 8) ;

- deux flèches ont été montées avec 3 plumes synthétiques (vanes) collées radialement, parallèlement à l'axe de la flèche (empennage droit) : une avec des vanes de 2-7/8 pouces (n° 7), l'autre avec des vanes de 4-3/4 pouces (n° 10) (fig. 10) ;
- deux flèches ont été équipées d'empennages très freinants constitués, pour la première, de 6 plumes fluflu de 5 pouces, montées radialement sur le fût (empennage droit) (n° 1), et pour la seconde, d'une plume fluflu complète collée en spirale sur le fût (n° 8) (fig. 11) (Frédéric, 1985 : 62 ; Greenland, 2000 : 54) ;
- six flèches ont été équipées de plumes naturelles de 2-1/2, 4 et 5 pouces désaxées par rapport à l'axe du fût. Deux orientations ont été données aux empennages de chaque taille : une compensation simple (*offset*) (n° 17, 20, 11), permettant de garder la courbure naturelle de la plume (cf. § 1.2.2.), et un montage hélicoïdal pour lequel la courbure naturelle de la plume a été accentuée, jusqu'à doubler sa valeur initiale (n° 14, 22, 5) (fig. 13).

N° réf	Type d'empennage équipant la flèche	Surface totale d'empennage (cm ²)	Masse de la flèche terminée (g)
1	6 flufu de 5 " (12,5 cm) droites	267,00	37,58
2	3 plumes de 4 " (10 cm) droites	26,63	35,36
3	3 flufu de 5 " (12,5 cm) droites	133,50	36,1
4	Sans plumes	0,00	38,58
5	3 plumes de 5 " (12,5 cm) hélicoïdales	33,75	34,4
6	3 plumes de 8 " (20 cm) droites	75,00	38,64
7	3 vanes 2-7/8 " (7,4 cm) droites	17,48	34,48
8	1 flufu complète montée en spirale	51,25	36,87
9	3 plumes de 5 " (12,5 cm) droites	33,75	34,78
10	3 vanes 4-3/4 " (12 cm) droites	27,38	35,58
11	3 plumes de 5 " (12,5 cm) <i>offset</i>	33,75	34,43
12	3 plumes de 2-1/2 " (6 cm) droites	12,38	34,97
14	3 plumes de 2-1/2 " (6 cm) hélicoïdales	12,38	33,46
15	Sans plumes	0,00	31,34
17	3 plumes de 2-1/2 " (6 cm) <i>offset</i>	12,38	33,13
21	3 plumes de 4 " (10 cm) <i>offset</i>	26,63	32,69
22	3 plumes de 4 " (10 cm) hélicoïdales	26,63	33,09

TAB. 2 – Caractéristiques des flèches utilisées pour la première expérimentation (seules les caractéristiques nécessaires aux calculs et à la compréhension de l'expérimentation ont été reprises dans le tableau).

N° réf	Type empennage	Surface totale d'empennage (cm ²)	Longueur totale fût + pointe (cm)	Masse flèche terminée (g)
J2	Parabolique 4 "	26,63	70	25,66
G1	Parabolique 4 "	26,63	73	30,35

TAB. 3 – Caractéristiques des flèches utilisées pour le premier test de la 2^e expérimentation (seules les caractéristiques indispensables à la compréhension et aux calculs propres à l'expérimentation ont été reprises dans le tableau).

2.2.2. Expérimentation sur l'influence de l'arc

Lors de la deuxième expérimentation, deux tests ont été réalisés. Pour le premier, deux flèches différentes ont été utilisées. Elles ont été choisies en fonction de l'allonge du possesseur de l'arc Merlin (23,5 pouces). Le second test a été effectué avec la flèche n° 9 (empennage de 3 plumes paraboliques de 5 pouces), déjà utilisée dans la première expérimentation (tab. 2).

2.3. L'arbrier d'expérimentation

Pour les tests envisagés, il était indispensable d'avoir des paramètres de tir les plus constants possible. Afin d'éviter les variations de position et d'armement dus à l'inconstance humaine et à la fatigue, les tirs ont été effectués à l'aide d'un dispositif mécanique reproduisant, le mieux possible, l'utilisation d'un arc. Ce dispositif, conçu pour pouvoir accueillir de nombreux modèles d'arcs différents (Lepers, 2012), est constitué d'un arbrier porte-arc monté sur un trépied (fig. 4). Une fois l'arc fixé sur son support, l'ensemble

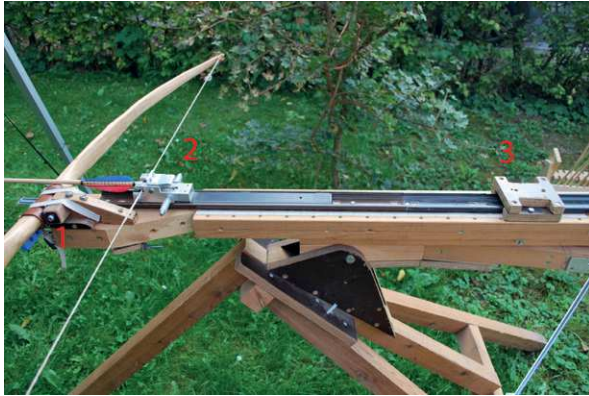


FIG. 4 – L'arbrier d'expérimentation.
De gauche à droite,
l'arc et son dispositif de maintien (1),
le chariot portant le déclencheur (2)
et, à droite, la butée d'arrêt réglable (3).

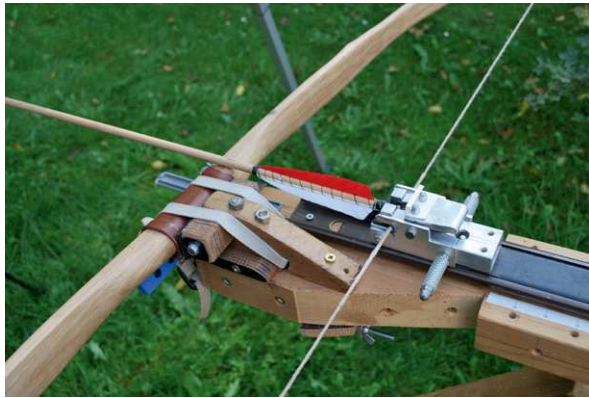


FIG. 5 – Le chariot mobile et son déclencheur
mécanique.

prend l'aspect d'une arbalète, massive et lourde, qui peut être fixée au sol afin de garantir l'absence de mouvement parasite et une stabilité maximale. L'arc est armé au moyen d'un chariot mobile portant un déclencheur mécanique (fig. 5). Ce déclencheur peut, à volonté, maintenir et relâcher la corde et la flèche. La course du chariot guidée par un rail et des roulements, peut être bloquée à des distances variables par une butée réglable, la plage de réglage variant de 10 à 39 pouces (de 25,4 à 99 cm) par pas de $\frac{1}{2}$ pouce (1,27cm).

L'arbrier dispose d'un système de réglage en site et en hausse. Ces aménagements se sont révélés particulièrement utiles pour orienter précisément les trajectoires des projectiles afin qu'ils survolent, sans les endommager, les cellules de mesures des deux chronographes.

Mise à part la disposition horizontale de l'arc, ce dispositif permet des conditions de tir très proches des pratiques classiques. Lors de la décoche, outre les frottements de l'air sur la flèche, seuls la joue d'arc et le repose flèche (qui assure son guidage latéral) sont susceptibles de ralentir le projectile.

2.4. Les chronographes (fig. 6)

Selon les expérimentations, un ou deux chronographes ont été utilisés pour mesurer la vitesse des projectiles. Ces appareils, de marque Chrony (type *alpha*), permettent de mesurer la vitesse de projectiles se déplaçant de 30 à 7000 pieds par seconde (de 10 à 2134 m/s), avec une précision de 99,5 %. Ils fonctionnent au moyen de deux capteurs photosensibles qui détectent le passage du projectile. Posés sur des trépieds photographiques, ils nécessitent quelques précautions pour effectuer des mesures précises :

- les fenêtres de passage au-dessus des cellules sont étroites (un trapèze de 7 cm de large à la base, 33 cm de large à son sommet et 38 cm de haut), ce qui impose beaucoup de prudence lorsqu'on éloigne l'appareil de l'arc (fig. 7) ;
- l'obtention de la mesure nécessite le passage du projectile au-dessus des deux capteurs, ce qui impose un alignement parfait de la trajectoire de la flèche et de chaque chronographe ;
- du fait de leur principe de fonctionnement, il est important de disposer d'une luminosité constante. Comme je l'ai constaté lors d'essais préalables, un soleil généreux est à même de perturber les appareils (le passage de la flèche ne générant plus une diminution suffisante



FIG. 6 – Le type de chronographe utilisé pour les
expérimentations.

de luminosité). Il est donc parfois nécessaire d'ajouter des écrans aux chronographes.

Étant donné le faible espace existant entre les deux cellules (environ 30 cm), les mesures obtenues peuvent être considérées comme « ponctuelles », ce qui constitue un avantage dans le cadre des expérimentations réalisées.

La même procédure a été suivie lors des 3 expérimentations : Les tirs ont été répétés avec chaque projectile, jusqu'à obtenir un minimum de dix tirs reproductibles pour chaque chronographe. Ont été considérées comme reproductibles et acceptables les mesures présentant un écart inférieur à 2,5 % de la moyenne des résultats pour le point de mesure et le projectile considéré.

L'étroitesse de la fenêtre de passage sur les détecteurs a compliqué la collecte des mesures sur le chronographe le plus éloigné, le moindre mouvement parasite de l'arbrier de l'arbalète entraînant une modification de trajectoire susceptible d'écartier la flèche des capteurs photosensibles. Ces aléas liés au matériel ont engendré une multiplication du nombre de tirs nécessaires pour obtenir 10 valeurs reproductibles sur le second chronographe, ce qui explique l'échantillon important de valeurs obtenues à 1 m de l'arc pour certains projectiles.

Toutes les mesures enregistrées lors des différentes expérimentations sont reprises dans les tableaux joints en annexe de cet article. Les calculs nécessaires à l'analyse des résultats présentés dans les paragraphes suivants ont été obtenus à partir des valeurs moyennes des vitesses mesurées sur chaque chronographe pour les différents projectiles.

3. Expérimentation sur l'influence de l'empennage

Cette expérimentation avait pour but de comparer le comportement en vol de projectiles munis d'empennages différents (paramètre qui ne semble pas avoir retenu l'attention des expérimentateurs jusqu'à présent).

Les dix-sept flèches, décrites au § 2.2.1, ont été tirées avec l'arc primitif en orme décrit au § 2.1, placé sur l'arbrier, armé à l'allonge de 29,5 pouces pendant toute l'expérimentation (§ 2.3). Deux chronographes ont été placés

sur la trajectoire des projectiles de façon à mesurer la vitesse des flèches à 1 et 6 m de l'arc.

Afin de faciliter l'interprétation des résultats, les flèches ont été regroupées par catégorie d'empennage. Certains types pouvant entrer dans plusieurs catégories, ils sont repris dans chacune d'entre elles.

L'exigence de 10 tirs reproductibles n'a pu être appliquée pour les flèches sans empennage et n'a été que partiellement respectée pour les flèches n° 22 – empennage droit de 3 plumes de 4 pouces – et 11 – empennage compensé de 3 plumes de 5 pouces. Pour chacun de ces 2 projectiles, une des mesures obtenues sur le deuxième chronographe a été écartée lors de l'analyse des résultats limitant l'échantillon statistique à 9 valeurs.

3.1. Résultats obtenus pour les empennages droits

Sont repris dans ce paragraphe, les valeurs moyennes des résultats obtenus pour les flèches sans empennage et celles munies de 3 plumes parallèles à l'axe du fût.

La comparaison des résultats obtenus pour la flèche empennée de 3 plumes de 4 pouces (n° 2) et celle munie de 3 plumes de 5 pouces (n° 9) illustre bien l'importance du choix de paramètres de comparaison pertinents. Sur base des vitesses moyennes mesurées par le premier chronographe, on constate que la flèche à 3 plumes de 5 pouces (n° 9) est plus rapide que celle à 3 plumes de 4 pouces (n° 2), malgré une surface d'empennage plus élevée (tab. 4). Cette « anomalie » s'explique par la masse plus faible du premier projectile ($\pm \frac{1}{2}$ g). Si on compare l'énergie des 2 projectiles, on constate logiquement que la flèche n° 2 a une énergie supérieure à celle de la n° 9.

Les flèches sans empennage n'ont pu être correctement testées. La première (n° 4) s'est cassée lors du premier impact, tandis que la n° 15 n'a permis que quelques tirs et l'enregistrement d'une seule mesure sur chaque chronographe. Son vol étant trop instable, les tests n'ont pas été poursuivis pour éviter d'endommager les chronographes. En tenant compte qu'on ne dispose pour le projectile n° 15 que d'une seule valeur exploitable pour



FIG. 7 – L'ensemble du dispositif de tir lors de la première expérimentation : l'arbrier avec l'arc, les deux chronographes à 1 m et 6 m de l'arc et, au fond, la cible destinée à recueillir les projectiles.



FIG. 8 – Les flèches reprises dans la catégorie « empennages droits ».
De haut en bas : flèche sans empennage, empennage de 2-1/2 pouces, de 4 pouces, de 5 pouces et empennage de 3 flufu de 5 pouces.

chaque chronographe, on notera qu'à la sortie de l'arc, c'est la flèche la plus rapide des dix-sept projectiles testés (tab. 4). Son énergie plus faible que celle des autres projectiles s'explique par sa masse inférieure et, peut être aggravée par l'absence d'empennage qui nuit au transfert de l'énergie, la flèche partant trop rapidement pour recevoir toute l'énergie de l'arc. La mesure obtenue sur le deuxième chronographe montre une diminution très nette de sa vitesse et de son énergie après 6 m (-8,68 % d'énergie en 5 m). Malgré l'absence d'empennage, et donc une surface de frottement limitée au seul fût et à la pointe, elle perd plus d'énergie en 5 m de vol que la flèche avec empennage de 3 plumes de 8 pouces, soit 75 cm² de surface (n° 6). Ces pertes de vitesse et d'énergie sont vraisemblablement causées par les mouvements désordonnés de la flèche qui peine à trouver une trajectoire de vol stable et linéaire. Ces mouvements désordonnés consomment, en pure perte, une partie de l'énergie reçue de l'arc.

Cette observation semble en contradiction avec les informations offertes par l'ethnographie, qui montrent l'usage courant de flèches sans empennage dans de nombreuses cultures traditionnelles. Dans l'état actuel de mes réflexions, je pense qu'il faut éviter toute généralisation abusive tant que d'autres pistes n'ont pas été explorées (point d'équilibre du projectile modifié, *band* de l'arc plus faible, etc.)

Les résultats obtenus sur le premier chronographe, pour les flèches munies d'empennages de longueur et de surface croissantes, montrent une décroissance régulière de l'énergie des projectiles lorsque la surface d'empennage – et donc les frottements – augmente.

Sur le deuxième chronographe, on constate que la flèche n° 12 a une énergie plus faible que les autres. En 5 m de vol, elle a perdu plus d'énergie que les autres projectiles (7,5 %) ; seul le projectile n° 3 (3 flufu de 5 pouces), avec une surface d'empennage dix fois plus élevée, perd davantage d'énergie. Ce phénomène s'explique par sa faible surface d'empennage qui peine à redresser et à orienter la flèche sur sa trajectoire (Frédéric, 1985 : 78). Comme pour la flèche sans empennage (n° 15), les mouvements désordonnés du projectile, constatés visuellement au

N° réf	Type d'empennage	Surface totale d'empennage (cm ²)	Masse flèche (g)	Vitesse moyenne chrono 1 (m/s)	Ecart type chrono 1	Nbre tirs chrono 1	Vitesse moyenne chrono 2 (m/s)	Ecart type chrono 2	Nbre tirs chrono 2	Energie moyenne chrono 1 (j)	Energie moyenne chrono 2 (j)	Perte de vitesse (%)	Perte d'énergie (%)
15	Sans plumes	0	31,44	43,93		1	41,98		1	30,34	27,70	4,44	8,68
12	3 plumes de 2-1/2 "	12,38	34,97	43,73	0,10	15	42,06	0,32	10	33,44	30,93	3,83	7,51
2	3 plumes de 4 "	26,63	35,36	43,52	0,18	19	43,10	0,33	10	33,49	32,84	0,97	1,93
9	3 plumes de 5 "	33,75	34,78	43,69	0,24	11	42,66	0,30	10	33,19	31,64	2,35	4,65
6	3 plumes de 8 "	75	38,64	41,79	0,18	13	40,28	0,53	11	33,74	31,34	3,61	7,09
3	3 flufu de 5 "	133,5	36,10	42,55	0,11	24	39,88	0,21	10	32,68	28,71	6,27	12,14

TAB. 4 – Résultats obtenus pour les projectiles repris dans la catégorie « empennages droits ».

cours des premiers mètres de la trajectoire, occasionnent une perte d'énergie importante. Des mesures complémentaires avec un troisième chronographe, placé à une distance plus grande de l'arc, permettraient de vérifier comment évoluent les pertes d'énergie une fois les flèches redressées.

C'est la flèche avec 3 plumes de 4 pouces (n° 2) qui perd le moins d'énergie : son empennage offre un bon compromis entre la perte de vitesse et la stabilisation. La plus constante est celle dotée de 3 fluflu de 5 pouces (n° 3) qui montre l'écart type le plus faible sur le second chronographe, ce qui indique des mesures de vitesse plus groupées et une trajectoire plus régulière. Notons toutefois que ce résultat est atteint au prix d'une perte d'énergie importante.

On retiendra donc que, dans les conditions de ce test, les flèches équipées de 3 plumes de 4 pouces ou de 3 plumes de 5 pouces offrent les pertes d'énergie les plus faibles et constituent les meilleurs compromis pour les empennages droits. L'empennage de 5 pouces serait sans doute plus adapté en situation de tir réel, car il est plus apte à « compenser » les petites erreurs et irrégularités toujours présentes lors d'une décoche manuelle, moins régulière que le dispositif mécanique utilisé pour l'expérimentation.

Perte d'énergie en fonction de la surface d'empennage

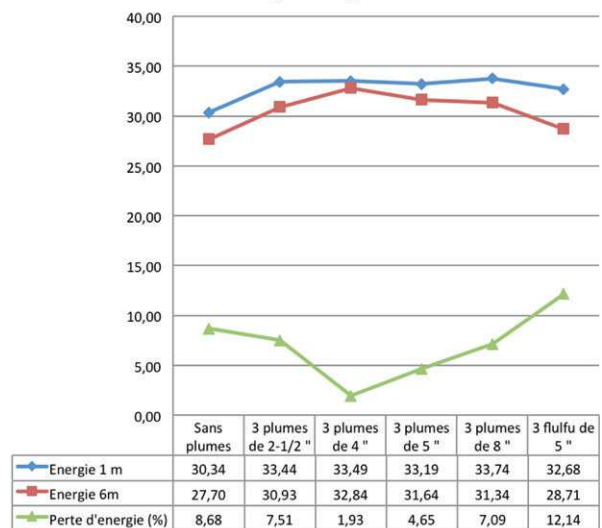


FIG. 9 – Influence de la surface d'empennage sur l'énergie du projectile. L'efficacité des empennages de 4 et 5 pouces apparaît clairement : les deux courbes (à 1 et 6 m de l'arc) se rapprochent et la courbe de perte d'énergie montre les valeurs les plus faibles pour ces empennages.

3.2. Résultats obtenus pour les empennages synthétiques (vanes)

Les résultats obtenus pour les deux flèches équipées de plumes synthétiques sont comparés avec ceux des projectiles équipés de plumes naturelles de tailles proches (cf. tab. 5). Leur observation confirme ce qui est dit dans les clubs de tir à l'arc : les vanes freinent davantage que les plumes naturelles, mais la différence constatée est très faible. On constate que les énergies des différentes flèches mesurées à 1 m de l'arc sont très proches. Lors de son passage sur le second chronographe, la flèche à 3 vanes de 2-7/8 pouces (n° 7) a perdu plus d'énergie que celle à 3 vanes de 4-3/4 pouces (n° 10). Ceci confirme le constat effectué avec les empennages droits en plumes naturelles : un petit empennage redresse moins vite la flèche qu'un grand, ce qui entraîne des mouvements désordonnés du projectile et accroît la perte d'énergie.

Le moindre étalement des mesures obtenues avec les vanes plutôt qu'avec les plumes naturelles montre que des projectiles équipés de vanes ont une vitesse plus constante et permettent donc, à priori, une meilleure reproductivité des tirs. On peut toutefois mettre en doute la pertinence de leur usage lors d'expérimentations balistiques à des fins archéologiques et tracéologiques.



FIG. 10 – Empennages naturels et synthétiques. De haut en bas : empennage naturel de 2-1/2 pouces, empennage de vanes de 2-7/8 pouces, empennage naturel de 5 pouces, empennage de vanes de 4-3/4 pouces.

3.3. Résultats obtenus pour les empennages freinants (tab. 6 et fig. 12)

Dans cette catégorie sont reprises les flèches munies d'empennages freinants (dont la n° 3, déjà intégrée dans la catégorie des empennages droits) dont les résultats sont comparés avec le projectile n° 9, à 3 plumes de 5 pouces et 33,75 cm² de surface d'empennage. Les résultats obtenus pour les 3 flèches de cette catégorie (nos 3, 1 et 8), montrent, en 5 m de trajectoire, un ralentissement rapide et une perte d'énergie très importante, alors que les différences d'énergie entre ces projectiles sont faibles sur le premier chronographe. Cette perte est liée à l'augmentation de la surface d'empennage ou à sa disposition sur la flèche comme en témoigne la n° 8, « fluflu spirale », qui subit un ralentissement très élevé pour une surface d'empennage totale de 51,25 cm², de loin inférieure à la surface d'empennage des deux autres, munies de plumes fluflu.

L'utilisation d'empennage de ce type pour des expérimentations balistiques n'a sans doute que peu d'intérêt (même la flèche n° 3 accuse une perte d'énergie de 12 % en 5 m). L'ethnographie et la pratique sportive actuelle montrent que de tels empennages sont réservés à des usages particuliers (tir sur des oiseaux en vol à courte distance, tir sportif sur cibles



FIG. 11 – Les flèches équipées d'empennages freinants.

De haut en bas, flèche de référence n° 9 (3 plumes paraboliques de 5 pouces), flèche n° 3 (3 plumes fluflu de 5 pouces), flèche n° 1 (6 plumes fluflu de 5 pouce), flèche n° 8 dont l'empennage est constitué d'une plume fluflu collée en hélice sur le fût de la flèche. (On notera les dégâts subis par l'empennage au cours de l'expérimentation).

N° réf	Type d'empennage	Surface totale d'empennage (cm ²)	Masse flèche (g)	Vitesse moyenne chrono 1 (m/s)	Ecart type chrono 1	Nbre de tirs chrono 1	Vitesse moyenne chrono 2 (m/s)	Ecart type chrono 2	Nbre de tirs chrono 2	Energie moyenne chrono 1 (j)	Energie moyenne chrono 2 (j)	Perte de vitesse (%)	Perte d'énergie (%)
12	3 plumes 2-1/2 "	12,38	34,97	43,73	0,10	15	42,06	0,32	10	33,44	30,93	3,83	7,51
7	3 vanes 2-7/8 "	17,48	34,48	43,62	0,08	11	41,86	0,14	10	32,80	30,21	4,03	7,90
9	3 plumes 5 "	33,75	34,78	43,69	0,24	11	42,66	0,30	10	33,19	31,64	2,35	4,65
10	3 vanes 4-3/4 "	27,38	35,58	42,66	0,12	10	41,60	0,14	10	32,37	30,79	2,47	4,88

TAB. 5 – Résultats obtenus avec les flèches équipées d'empennages droits et synthétiques de tailles proches.

N° réf	Type d'empennage	Surface totale d'empennage (cm ²)	Masse flèche (g)	Vitesse moyenne chrono 1 (m/s)	Ecart type chrono 1	Nbre tirs chrono 1	Vitesse moyenne chrono 2 (m/s)	Ecart type chrono 2	Nbre tirs chrono 2	Energie moyenne chrono 1 (j)	Energie moyenne chrono 2 (j)	Perte de vitesse (%)	Perte d'énergie (%)
9	3 plumes 5 "	33,75	34,78	43,69	0,24	11	42,66	0,30	10	33,19	31,64	2,35	4,65
3	3 flufu 5 "	133,50	36,10	42,55	0,11	24	39,88	0,21	10	32,68	28,71	6,27	12,14
1	6 flufu 5 "	267,00	37,58	41,88	0,31	19	38,29	1,18	10	32,96	27,55	8,57	16,41
8	Flufu spirale	51,25	36,87	41,69	0,22	14	36,65	0,25	10	32,03	24,76	12,09	22,72

TAB. 6 – Résultats obtenus avec les flèches équipées d'empennages freinants (la flèche n° 9 est reprise en référence).

Perte d'énergie du projectile selon le type d'empennage

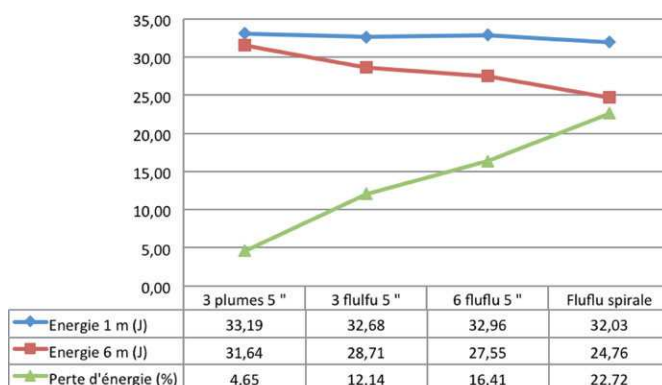


FIG. 12 – Influence du type et de la surface d'empennage sur l'énergie du projectile. La 3^e courbe montre que la perte d'énergie de certains projectiles peut atteindre plus de 20 % en seulement 5 m de trajectoire, alors que leurs énergies de départ sont relativement proches.

mobiles ou flèches dont on veut minimiser la portée et donc le risque de perte).

Comme pour les autres projectiles, disposer de mesures de vitesse à 10 m du premier chronographe serait intéressant pour préciser l'évolution de cette diminution d'énergie à plus longue distance.

Au niveau des remarques pratiques, on notera la fragilité de l'empennage « fluflu spirale ». Son enroulement autour du fût expose le calame de la plume contre la joue de l'arc et la main de l'archer (ou le repose flèche). Ces frottements entraînent une usure rapide de la base de la plume et une fragilisation importante de l'empennage.

3.4. Résultats obtenus pour les empennages compensés et hélicoïdaux (tab. 7 et fig. 14)

Dans cette catégorie, sont reprises les six flèches munies d'empennages désaxés par rapport à l'axe du fût (empennage compensé - *offset* - et hélicoïdaux) comparées aux 3 flèches munies d'empennages droits de même surface. Les résultats sont surprenants et très instructifs ! Il est courant de lire dans la littérature spécialisée que les flèches montées avec des empennages compensés ou hélicoïdaux sont plus précises mais moins rapides que celles équipées d'empennages

N° réf	Type d'empennage	Surface totale d'empennage (cm ²)	Masse flèche (g)	Vitesse moyenne chrono 1 (m/s)	Ecart type chrono 1	Nbre tirs chrono 1	Vitesse moyenne chrono 2 (m/s)	Ecart type chrono 2	Nbre tirs chrono 2	Energie moyenne chrono 1 (j)	Energie moyenne chrono 2 (j)	Perte de vitesse (%)	Perte d'énergie (%)
12	3 plumes 2-1/2 " droites	12,38	34,97	43,73	0,10	15	42,06	0,32	10	33,44	30,93	3,83	7,51
17	3 plumes 2-1/2 " <i>offset</i>	12,38	32,74	44,89	0,21	13	43,62	0,33	10	32,99	31,15	2,84	5,59
14	3 plumes 2-1/2 " hélicoïdales	12,38	33,10	44,07	0,15	11	42,97	0,24	10	32,15	30,56	2,51	4,95
2	3 plumes 4 " droites	26,63	35,36	43,52	0,18	19	43,10	0,33	10	33,49	32,84	0,97	1,93
21	3 plumes 4 " <i>offset</i>	26,63	31,91	43,53	0,15	22	42,70	0,21	10	30,23	29,09	1,91	3,78
22	3 plumes 4 " hélicoïdales	26,63	32,40	44,11	0,28	22	43,53	0,22	8	31,52	30,70	1,31	2,61
9	3 plumes 5 " droites	33,75	34,78	43,69	0,24	11	42,66	0,30	10	33,19	31,64	2,35	4,65
11	3 plumes 5 " <i>offset</i>	33,75	34,43	43,95	0,20	14	42,92	0,16	10	33,25	31,72	2,33	4,60
5	3 plumes 5 " hélicoïdales	33,75	34,40	43,78	0,23	14	43,06	0,21	10	32,98	31,90	1,66	3,29

TAB. 7 – Résultats obtenus avec les flèches équipées d'empennage droits, compensés ou hélicoïdaux de 2-1/2, 4 et 5 pouces.



FIG. 13 – Les flèches équipées d'empennages compensés et hélicoïdaux.

De haut en bas,
empennages de 2-1/2 pouces : droit, compensé,
hélicoïdal ;
empennages de 4 pouces : droit, compensé, hélicoïdal ;
empennages de 5 pouces : droit, compensé, hélicoïdal.

droits (Frédéric, 1985 : 80 ; Greenland, 2000 : 40). Les mesures effectuées en sortie d'arc (chronographe 1) montrent effectivement une diminution de l'énergie en fonction de l'ampleur du mouvement d'hélice donné à l'empennage, à l'exception notable de la flèche à 3 plumes de 5 pouces *offset* (n° 11) qui montre une légère augmentation d'énergie par rapport à l'empennage droit avec 3 plumes de 5 pouces (n° 9).

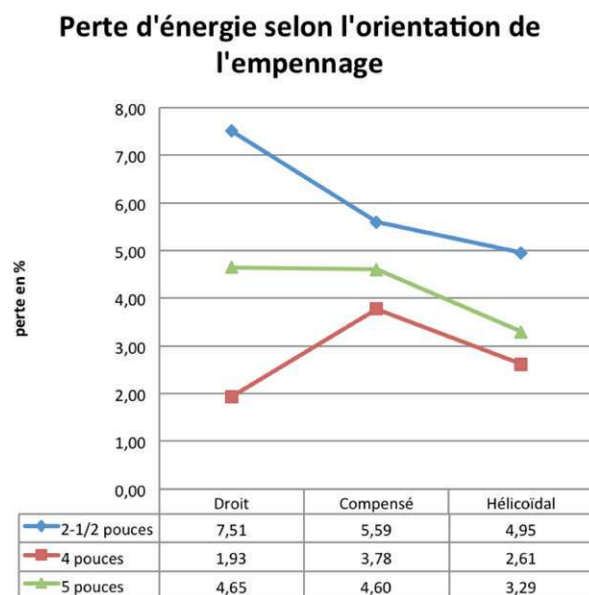


FIG. 14 – Influence de l'orientation de l'empennage sur l'énergie du projectile. On notera qu'à l'exception des empennages de 4 pouces, le montage compensé ou hélicoïdal permet une meilleure conservation de l'énergie du projectile.

Si l'on considère l'évolution de l'énergie du projectile en cours de vol en fonction de la surface d'empennage, (mesures obtenues sur le 2^e chronographe), on constate que les projectiles équipés d'empennages compensés et hélicoïdaux de 2-1/2 pouces (n^{os} 7 et 14) perdent moins de vitesse et d'énergie que la flèche munie d'un empennage droits de même longueur (n° 12). Cela s'explique sans doute par la rotation accentuée des projectiles compensés et hélicoïdaux, qui stabilise plus rapidement le projectile, tout en minimisant les frottements.

Au contraire, les flèches munies d'empennages compensés et hélicoïdaux de 4 pouces (n^{os} 21 et 22) ont une énergie moindre sur chaque chronographe que les empennages droits de même longueur. Ces projectiles montrent une perte d'énergie en vol (deuxième mesure) plus importante que pour un projectile équipé d'un empennage droit de même longueur. Si l'on se réfère aux données obtenues pour les empennages droits (§ 4.1), on sait que l'empennage de 4 pouces constitue un excellent compromis pour stabiliser la flèche au prix d'un freinage limité. On peut se poser la question de l'intérêt de monter des empennages de cette taille avec une compensation ou hélicoïdalement. On constatera toutefois que la perte d'énergie des empennages compensés ou hélicoïdaux de 4 pouces reste très faible (inférieure à celle des autres projectiles, si ce n'est celui à 3 plumes hélicoïdales de 5 pouces – n° 5), tout en offrant un faible écart type entre les mesures.

En tenant compte du fait qu'une décoche manuelle est toujours moins nette qu'une décoche mécanique, ce type de montage présente donc de l'intérêt dès lors qu'on cherche un projectile au vol le plus constant possible et qui conserve un maximum d'énergie pour l'impact. Compte tenu des différences de masses assez importantes entre ces 3 flèches, ces conclusions doivent être considérées avec prudence dans l'attente de tests complémentaires.

Le cas des empennages compensés et hélicoïdaux de 5 pouces (flèches n^{os} 11 et 5) est intéressant. La comparaison de l'énergie de trois flèches (n^{os} 5, 9 et 11), sur le premier chronographe, montre une énergie plus élevée pour l'empennage compensé (n° 11) et une valeur à peine inférieure pour l'empennage

nage hélicoïdal (n° 5) que pour l'empennage droit (n° 9). Lors du passage sur le deuxième chronographe, on constate que les deux flèches à empennage compensé et hélicoïdal (n°s 11 et 5) possèdent une énergie supérieure à celle munie d'un empennage droit (n° 9). Ces projectiles perdent donc moins vite leur énergie en cours de vol qu'une flèche équipée d'un empennage droit de même taille. Les faibles écarts types constatés pour ces empennages de 5 pouces (n°s 11 et 5) confirment également leur intérêt en ce qui concerne la constance du vol.

Les observations effectuées sur cette série de projectiles peuvent paraître surprenantes. Mais les mesures effectuées prouvent que le phénomène est bien réel. La rotation accentuée des projectiles munis d'empennages compensés s'explique par des phénomènes assez complexes de frottements et de flux de circulation d'air au contact des empennages. Même si je n'ai pas encore d'explication réellement satisfaisante pour ce phénomène, il est manifeste que l'usage d'empennages compensés présente davantage d'intérêt qu'un simple gain de précision.

Des tests complémentaires seraient nécessaires pour déterminer la combinaison idéale entre la compensation imposée à la plume, sa longueur et la taille de la flèche, mais ils sortent du cadre de cette étude.

3.5. Conclusions de la première expérimentation

Comme le démontre cette expérimentation, chiffres à l'appui, si la vitesse d'un projectile est un paramètre essentiel pour le calcul de son énergie, il n'est pas adéquat pour juger de son efficacité.

Le type d'empennage équipant une flèche (et vraisemblablement une sagaie) influe fortement sur son vol et sur la quantité d'énergie disponible lors de l'impact. Étant donnée la difficulté avec laquelle certains types d'empennages redressent une flèche, on ne peut exclure que certains stigmates, parfois présents sur des armatures (fractures par flexion par exemple), puissent être imputés au comportement du projectile plutôt qu'à la nature de la cible.

L'énergie dont dispose un projectile peut fortement varier au cours de son déplacement. Une mesure de vitesse (ou d'énergie) moyenne ne constitue pas une indication fiable de ses qualités. Des mesures « ponctuelles » de sa quantité d'énergie, en plusieurs points de sa trajectoire, sont essentielles pour se faire une idée correcte de ses qualités balistiques.

Avant toute expérimentation balistique, le choix d'un projectile (flèche ou sagaie) doit être fait sur base de critères raisonnés. À condition de disposer de mesures de vitesse effectuées en plusieurs points de sa trajectoire, il est possible d'établir son profil de vol et de déterminer de quelle manière sa vitesse et son énergie décroissent en progressant vers la cible, pour un arc et une allonge données.

Une bonne modélisation nécessiterait un minimum de trois points de mesure encadrant la portée estimée :

- quand la flèche quitte l'arc (1 m) ;
- en cours de trajectoire (à la moitié de la distance de tir considérée) ;
- à une distance égale ou supérieure à la distance de tir considérée comme réaliste pour l'expérimentation envisagée.

N'ayant pu quantifier l'énergie des flèches qu'en deux points de leur trajectoire, les expérimentations décrites ci-après ont une portée indicative, mais les résultats sont suffisamment significatifs pour être publiés et incitent à persévérer dans cette voie.

4. Expérimentation sur l'influence de l'arc propulsant la flèche

La seconde expérimentation avait pour but de comparer l'énergie acquise par un projectile donné et projeté dans des conditions identiques par des arcs différents (§ 2.1). L'expérimentation a été réalisée en deux phases distinctes.

4.1. Test de deux arcs différents à allonge et force comparables

Le *flatbow* 1001 en orme et l'arc Merlin (§ 2.1) ont été placés sur l'arbrier et armés à 23,5 pouces (allonge usuelle du propriétaire de l'arc Merlin). À cette allonge, les deux arcs



FIG. 15 – Dispositif mis en place pour le premier test de la deuxième expérimentation.

nécessitent la même force de traction. Tous deux ont été utilisés pour tirer deux flèches de masses différentes (voir tab. 3). Les tirs ont été répétés pour disposer, pour chaque arc et pour chaque projectile, d'au moins dix mesures reproductibles. Un seul chronographe a été placé à 1 m de l'arc.

Seules 6 valeurs reproductibles ont pu être collectées pour la première flèche (J2) et 8 pour la seconde (G1), propulsées avec l'arc Merlin. Ce faible échantillon est dû à des difficultés de fixation de l'arc Merlin (muni d'une poignée plus ergonomique que les arcs traditionnels) sur l'arbrier de tir.

Les résultats montrent que, pour les deux arcs, le projectile le plus lourd accumule davantage d'énergie, malgré une vitesse moindre (de l'ordre de 2 m/s) (tab. 8). Cette différence s'explique par la plus grande inertie du projectile le plus lourd, qui permet ainsi un meilleur transfert d'énergie de l'arc vers la flèche.

Si on compare les différences de vitesse et d'énergie acquises par les projectiles selon les arcs qui les propulsent, dans les mêmes conditions d'allonge et de force, le constat est impressionnant : les flèches propulsées par l'arc « traditionnel primitif » souffrent d'un déficit de vitesse de l'ordre de 14 % par rapport aux projectiles lancés par l'arc « Merlin ». Si on prend en compte l'énergie, le déficit est de $\pm 26\%$ en défaveur du *flatbow* 1001.

L'explication tient aux qualités de l'arc « traditionnel moderne », renforcé de fibres de verre, mais la différence de taille entre les deux arcs peut avoir légèrement pénalisé le *flatbow*, utilisé en sous-allonge et dont les branches, plus longues, consomment davantage d'énergie lors de la décoche. D'un point de vue technique, le sandwich « fibre de verre-bois-fibre de verre » de l'arc « Merlin » constitue un matériau sans équivalent dans la nature, qui n'est pas sans rappeler les

	Allonge (")	Force de l'arc (lbs)	Référence flèche	Masse flèche (g)	Vitesse moyenne (m/s)	Ecart type	Energie moyenne (J)	Perte de vitesse (%) (*)	Perte d'énergie (%)(*)
<i>Merlin</i>	23,5	34	J2	25,66	42,17	0,22	22,82		
<i>Merlin</i>	23,5	34	G1	30,35	40,12	0,20	24,43		
<i>Flatbow 1001</i>	23,5	34	J2	25,66	36,31	0,05	16,91	13,90	25,87
<i>Flatbow 1001</i>	23,5	34	G1	30,35	34,41	0,11	17,96	14,25	26,46

* : perte de vitesse et d'énergie de la flèche propulsée avec l'arc Flatbow 1001 par rapport à la même flèche propulsée par l'arc Merlin.

TAB. 8 – Résultats obtenus avec des arcs différents mais allonge et force identiques. Les pourcentages de pertes de vitesse et d'énergie concernent l'arc *flatbow* 1001 comparé à l'arc Merlin.

arcs composites traditionnels aux branches constituées d'un assemblage de corne, bois et tendons (McEwen, 1991a). Ce type d'arc (comportant des fibres de verre) offre un bien meilleur rendement mécanique que l'arc « traditionnel primitif » testé.

4.2. Test de deux arcs différents à allonge identique et force différente

Pour ce test, le *longbow* 2005 en if placé sur l'arbrier a été armé à une allonge de 29,5 pouces pour lancer la flèche à 3 plumes de 5 pouces (n° 9). Les vitesses du projectile ont été mesurées en deux points de la trajectoire (1 et 6 m) et le test a été répété jusqu'à l'obtention d'un minimum de dix mesures reproductibles sur chaque chronographe. Les résultats ont ensuite été comparés avec ceux obtenus pour la même flèche propulsée par le *flatbow* 1001 en orme.

Une mesure obtenue sur le second chronographe pour le *longbow* 2005 a été écartée lors de l'analyse des résultats pour écart excessif à la moyenne.

Le *longbow* 2005 en if étant, à même allonge, plus puissant que le *flatbow* 1001 en orme (tab. 1, § 2.1), on pouvait logiquement s'attendre à voir la flèche se déplacer avec une vitesse et une énergie supérieures. Les valeurs obtenues sur les deux chronographes confirment cette hypothèse mais, si on compare la perte d'énergie subie par la flèche en 5 m de trajectoire, on constate qu'elle est presque deux fois plus élevée pour le *longbow* 2005 en if que pour le *flatbow* 1001 en orme (tab. 9). Cette observation, à priori surprenante, s'explique par l'intensité des frottements subis par la flèche, qui augmente en fonction du carré de la vitesse (Benson, 2004 : 167 ; Hughes, 1998 : 350).

4.3. Conclusions de la seconde expérimentation

Comme le montre cette expérimentation, l'arc lui-même, par ses caractéristiques propres, peut influencer grandement sur la quantité d'énergie transmise au projectile. L'évolution de la quantité d'énergie du projectile en cours de vol est fonction non seulement de ses caractéristiques propres, mais également de sa vitesse initiale, conditionnée par l'arc.

Les résultats de ces expérimentations ne sont pas directement transposables à d'autres situations expérimentales, mais démontrent clairement la double nécessité de sélectionner rigoureusement le matériel utilisé et d'établir, pour chaque projet d'expérimentation balistique, un référentiel précis prenant en compte le dispositif de lancement et les types de projectiles envisagés.

5. Conclusions

Ces expérimentations confirment les réserves exprimées dans l'introduction et dans un précédent article (Lepers, 2011). Elles confirment l'idée que les systèmes d'armes (arc-flèches, propulseur-sagaies) sont des ensembles complexes. Considérer qu'un arc et une flèche (ou un propulseur et une sagaie) sont de simples vecteurs indifférents, qu'on peut acquérir « clé sur porte » et intégrer tels quels dans un projet expérimental, constitue une erreur susceptible de fausser ses résultats. L'usage inconsidéré d'arcs modernes comme moyen de propulsion peut également limiter (ou rendre impossible) la transposition des résultats obtenus dans un contexte d'usage réaliste par des cultures anciennes et/ou traditionnelles.

Arc	Flèche	Allonge (")	Masse flèche (g)	Vitesse moyenne chrono 1 (m/s)	Ecart type chrono 1	Nbre de tirs chrono 1	Vitesse moyenne chrono 2 (m/s)	Ecart type chrono 2	Nbre de tirs chrono 2	Energie moyenne chrono 1 (j)	Energie moyenne chrono 2 (j)	Perte de vitesse (%)	Perte d'énergie (%)
<i>Flatbow</i> 1001	9	29,5	34,78	43,69	0,24	11	42,66	0,30	10	33,19	31,64	2,35	4,65
<i>Longbow</i> 2005	9	29,5	34,78	48,99	0,23	15	46,63	0,74	10	41,74	37,81	4,83	9,42

TAB. 9 – Résultats obtenus avec des arcs différents propulsant la même flèche à allonge identique et force différente.

Outre les données propres aux projectiles en vol et les conclusions propres à chaque expérimentation, on retiendra de celles-ci que tout recours à une phase expérimentale balistique nécessite :

- la maîtrise et la compréhension du mode de fonctionnement du système d'arme retenu ;
- l'adéquation du matériel utilisé avec les possibilités techniques des cultures considérées ;
- la compréhension des principes physiques permettant d'expliquer son fonctionnement (mécanismes balistiques de base et notions de transferts d'énergie entrant en jeu dans le vol et l'impact d'un projectile).

Au-delà des certitudes qu'elles peuvent malmener, ces expérimentations ouvrent des perspectives qui permettent d'envisager une meilleure maîtrise des paramètres expérimentaux. Pour atteindre ce but, il est indispensable de faire précéder toute expérimentation balistique d'une phase d'étude et d'élaboration d'un modèle de référence cohérent et raisonné, contrôlé par une ou plusieurs expérimentation(s) préliminaire(s) destinée(s) à valider le modèle retenu. Cette phase préliminaire (ou d'étalonnage du matériel) est aussi l'occasion d'obtenir des données permettant des comparaisons plus aisées entre diverses expérimentations.

Il convient toutefois de rester prudent : planifier de telles expérimentations nécessite des compétences variées dans des domaines de la physique, des pratiques sportives et archéologique. Face à des projets mettant en jeu des variables multiples, il est tentant d'associer des personnes aux bagages scientifique et technique variés afin de couvrir toutes les facettes techniques du projet. Le danger est alors de réunir un aréopage de spécialistes de domaines tellement éloignés les uns des autres qu'il n'existe plus (ou trop peu) de zones de compréhension communes entre les différents intervenants. S'il n'existe pas, entre les différents acteurs, un minimum de « recouvrement de compétences », le risque est grand de voir le projet parsemé de zones d'ombre qui pourraient hypothéquer l'ensemble du projet.

6. Annexes

Les 3 tableaux ci-dessous reprennent l'ensemble des résultats des tirs effectués lors des expérimentations. Les mesures sont affichées en m/s.

- Une valeur notée en gras dans une case grisée désigne une mesure non retenue car s'écartant trop des valeurs moyennes.
- La notation « e1 » signifie une absence de détection du projectile par la première cellule du chronographe concerné.
- La notation « e2 » signifie une absence de détection du projectile par la seconde cellule du chronographe concerné.
- La notation « * » concerne certains tirs de réglages pour lesquels seul le premier chronographe était en place.

	chronographe 1 m vitesse en m/s																
Flèche n°	4	15	12	2	9	6	3	7	10	1	8	17	14	22	21	11	5
Type empennage	sans plumes	sans plumes	3 plumes 3"	3 plumes 4"	3 plumes 5"	3 plumes 8"	3 flufu 5"	3 vanes 2,6"	3 vanes 5"	6 flufu 5"	flufu spirale	3 plumes 3 "hélicoïdales offset	3 plumes 3 "hélicoïdales 2 X offset	3 plumes 4 "hélicoïdales offset	3 plumes 4 "hélicoïdales 2 X offset	3 plumes 5 "hélicoïdales offset	3 plumes 5 "hélicoïdales 2 X offset
Surface totale d'empennage	0	0	12,38	26,63	33,75	75	133,5	17,48	27,38	267	51,25	12,38	12,38	33,75	33,75	33,75	33,75
1		43,93	43,72	43,66	43,19	41,53	42,68	43,62	42,63	41,94	41,56	45,10	44,42	43,52	44,20	43,81	44,15
2			43,83	43,45	43,99	41,63	42,78	43,64	42,84	41,59	41,56	45,01	44,14	43,75	44,24	44,18	43,80
3			43,69	43,53	43,78	41,58	42,42	43,60	42,50	41,90	41,62	44,87	44,15	43,81	44,19	44,27	44,00
4			43,74	43,51	43,84	41,68	42,55	43,66	42,79	42,12	41,63	44,97	43,96	43,70	43,96	44,15	43,84
5			43,82	43,39	43,35	42,02	42,64	43,71	42,78	42,01	42,04	45,03	44,11	43,74	44,17	44,04	43,75
6			43,75	43,17	43,93	41,78	42,55	43,67	42,55	41,79	41,40	44,29	44,01	43,19	43,07	43,85	43,93
7			43,81	43,35	43,68	41,80	42,59	43,52	42,54	42,04	41,72	45,10	44,05	43,67	44,17	43,89	43,70
8			43,95	43,47	43,78	41,90	42,51	43,65	42,71	42,89	41,58	44,92	44,03	43,40	44,43	44,07	43,63
9			43,64	43,55	43,81	41,78	42,50	43,66	42,53	41,68	41,62	44,90	44,17	43,50	44,15	43,89	43,52
10			43,69	43,56	43,67	41,67	42,62	43,44	42,68	41,65	41,63	44,80	43,92	43,48	44,18	43,74	43,66
11			43,73	43,80	43,52	41,85	42,30			41,86	41,85	44,83	43,86	43,62	44,23	43,98	43,50
12			43,72	43,69		42,19	42,61			41,82	41,34	45,05		43,47	43,75	43,99	43,46
13			43,67	43,81		41,84	42,55			41,66	41,98	44,73		43,37	44,35	43,50	44,21
14			43,53	43,64			42,64			41,75	42,07			43,52	44,15	43,89	
15			43,65	43,60			42,45			41,57				43,60	44,19		
16				43,57			42,51			41,76				43,62	43,91		
17				43,12			42,69			41,85				43,50	44,15		
18				43,45			42,48							43,36	44,20		
19				43,56			42,67							43,37	44,01		
20							42,42							43,58	44,24		
21							42,62							43,50	44,46		
22							42,52							43,42	44,02		
23							42,47										
24							42,43										
Moyenne			43,73	43,52	43,69	41,79	42,55	43,62	42,66	41,88	41,69	44,89	44,07	43,53	44,11	43,95	43,78
Ecart type			0,10	0,18	0,24	0,18	0,11	0,08	0,12	0,31	0,22	0,21	0,15	0,15	0,28	0,20	0,24
Nbre total valeurs prise en compte :	359	1	15	19	11	13	24	10	10	17	14	13	11	22	22	14	13

	chronographe 6 m vitesse en m/s																	
Flèche n°	4	15	12	2	9	6	3	7	10	1	8	17	14	22	21	11	5	
Type empennage	sans plumes	sans plumes	3 plumes 3"	3 plumes 4"	3 plumes 5"	3 plumes 8"	3 flufu 5"	3 vanes 2,6"	3 vanes 5"	6 flufu 5"	flufu spirale	3 plumes 3" hélicoïdales offset	3 plumes 3" hélicoïdales 2 X offset	3 plumes 4" hélicoïdales offset	3 plumes 4" hélicoïdales 2 X offset	3 plumes 5" hélicoïdales offset	3 plumes 5" hélicoïdales 2 X offset	
Surface totale d'empennage	0	0	12,38	26,63	33,75	75	133,5	17,48	27,38	267	51,25	12,38	12,38	33,75	33,75	33,75	33,75	
1		41,98	41,57	43,40	42,13	40,52	40,26	41,88	41,47	37,55	37,04	44,18	42,96	42,61	43,24	48,40	42,93	
2			41,51	43,40	42,89	39,57	39,86	42,03	41,75	37,24	36,37	44,13	42,93	42,87	43,24	42,85	43,19	
3			41,81	43,40	42,45	39,84	40,04	42,04	41,52	39,25	36,42	43,80	42,86	42,81	43,85	42,87	43,13	
4			42,24	43,40	42,64	40,42	39,87	41,88	41,77	39,19	36,34	43,33	42,88	42,87	43,31	42,95	42,85	
5			42,30	43,40	42,27	40,11	39,71	41,94	41,61	39,71	36,55	43,30	42,87	42,75	43,46	42,89	42,99	
6			42,38	42,82	42,82	41,52	40,06	41,85	41,43	38,29	36,83	43,67	42,99	42,75	43,74	42,75	43,33	
7			42,27	42,75	42,81	39,82	39,51	41,82	41,52	36,67	36,86	43,27	43,28	42,73	43,67	42,97	42,93	
8			42,16	42,94	42,77	40,08	40,01	41,80	41,48	36,63	36,43	43,42	43,44	42,22	43,49	43,27	43,11	
9			42,05	42,71	43,13	40,28	39,78	41,83	41,62	39,45	36,73	43,54	42,55		43,57	42,73	42,77	
10			42,27	42,75	42,66	40,19	39,74	41,55	41,84	38,93	36,88	43,55	42,94		43,70	43,03	43,40	
11						40,72												
12																		
13																		
14																		
15																		
16																		
17																		
18																		
19																		
20																		
21																		
22																		
23																		
24																		
Moyenne			42,06	43,10	42,66	40,28	39,88	41,86	41,60	38,29	36,65	43,62	42,97	42,70	43,53	42,92	43,06	
Ecart type			0,32	0,33	0,30	0,53	0,21	0,14	0,14	1,18	0,25	0,33	0,24	0,21	0,22	1,74	0,21	
Nbre total valeurs prise en compte :	0	1	10	10	10	11	10	10	10	10	10	10	10	8	10	10	10	

TAB. 10 – Ensemble des données collectées lors de l'expérimentation sur l'influence de l'empennage (§ 3).

Arc	Merlin (m/s)		Flatbow 1001 (m/s)	
Flèche n°	J2	G1	J2	G1
Type empennage	parabolique 4 "	parabolique 4 "	parabolique 4 "	parabolique 4 "
	42,12	40,46	36,36	34,50
	41,84	39,94	36,33	34,48
	42,18	e2	36,28	34,23
	42,54	e2	36,36	34,50
	42,17	40,05	36,36	34,54
	42,17	40,36	36,32	34,33
	e2	40,23	36,25	34,40
	e2	39,94	36,22	34,34
	e2	40,01	36,26	34,28
	e2	39,99	36,33	34,47
	36,44			
	36,74			
Moyenne :	42,17	40,12	36,31	34,41
Ecart type	0,22	0,20	0,05	0,11
Nbre de valeurs retenues	6	8	10	10
Nbre de valeurs mesurées	8	8	15	10
Nbre de tirs	12	10	15	11

■ mesure a écarter

/ flèche non détectée

e1 non détection cellule 1

e2 non détection cellule 2

TAB. 11 – Ensemble des données collectées lors du premier test de l'expérimentation sur l'influence de l'arc propulsant la flèche (§ 4.1).

Arc	Chonographe 1, vitesse en m/s		Chonographe 2, vitesse en m/s	
	<i>Flatbow 1001</i>	<i>Longbow 2005</i>	<i>Flatbow 1001</i>	<i>Longbow 2005</i>
Flèche n°	9	9	9	9
Type empennage	3 plumes 5 "	3 plumes 5 "	3 plumes 5 "	3 plumes 5 "
	43,19	49,44	42,13	*
	43,99	49,14	42,89	30,82
	43,78	49,03	42,45	46,65
	43,84	49,05	42,64	46,65
	43,35	49,11	42,27	e2
	43,93	49,13	42,82	e1
	43,68	48,99	42,81	e1
	43,78	48,91	42,77	46,74
	43,81	48,66	43,13	46,21
	43,67	48,63	e1	46,66
	43,52	49,05	42,66	46,68
		48,83		46,40
		49,07		48,85
		49,04		47,15
		48,83		46,50
Moyenne :	43,69	48,99	42,66	46,63
Ecart type	0,24	0,23	0,30	0,26
Nbre de valeurs retenues	11	15	10	9
Nbre de valeurs mesurées	11	15	10	11
Nbre de tirs	11	15	11	15

- mesure à écarter
- / flèche non détectée
- e1 non détection cellule 1
- e2 non détection cellule 2
- * chrono non placé sur la trajectoire

TAB. 12 – Ensemble des données collectées lors second test de l'expérimentation sur l'influence de l'arc propulsant la flèche (§ 4.2).

Remerciements

Je tiens à remercier mon ami Jean Dumont pour le prêt de l'arc « Merlin » et pour les nombreuses et intéressantes discussions qui ont été à l'origine de ces expérimentations.

Bibliographie

- ALBARELLO B., 1986. « Sur l'usage des microlithes comme armatures de projectiles / The Use of Microliths to Frame Projectile », *Revue archéologique du Centre de la France*, 25-2 : 127-143.
- ALLELY S., ASBELL G., BAKER T., COMSTOCK P., GRAYSON B., GOSGROVE G., HAMM J., HARDCASTLE R., HERRIN A., LANGSTON G., MASSEY J., PARKER G., ST CHARLES J., SCHMIDT J., SILSBY S., STRUNK J. & TUKURA D., 2000. *The Traditional Bowyer's Bible*, Guilford Connecticut, Lyon Press, 4 vol., 1329 p.
- BAKER T., 1992. « The cause of arrow speed », *Bulletin of Primitive Technology*, 1-(3) : 57-64.
- BENSON H., 2004. *Physique 1 mécanique*, 3^e édition, Bruxelles, De Boeck, 636 p.
- BERGMAN C.A., MCEWEN E. & MILLER R., 1988. « Experimental Archery: Projectile Velocities and Comparison of Bow Performances », *Antiquity*, 62 : 658-670.
- CATTELAÏN P. & PERPÈRE M., 1995. « Tir expérimental de sagaies et de flèches emmanchées de pointes de la Gravette », *Archeo-Situla*, 17-20/1993 : 3-25.
- CHASTE D. & CHAPTAL F., 1990. *Le monde de la chasse à l'arc*, Paris, Gerfaut club, 277 p.
- FISCHER A., 1981. « Hunting with Flint-tipped Arrows: Results and Experiences from Practical Experiment », *Mesolithique Européen*, 3 : 29-39.
- FISCHER A., HANSEN P.V. & RASMUSSEN P., 1984. « Macro and Micro Wear Traces on Lithic Projectile Points. Experimental Results and Prehistoric Examples », *Journal of Danish Archaeology*, 3 : 19-46.
- FRÉDÉRIC L., 1985. *Tir à l'arc*, Paris, Robert Laffont, 229 p.
- GREENLAND H., 2000. *Guide pratique pour les archers traditionnels*, Ludwigshafen, A. Hörnig, 96 p.
- GRIMALDI S., 2009. *Experimental Observations of Early Mesolithic Points in North-east Italy*, in *Palethn° Projectile Weapon Elements from the Upper Palaeolithic Proceedings of Session C83, UISPP XV World Congress Lisbon (4-9 September 2006)*, p. 147-160.
- HUGHES S., 1998. « Getting to the Point: Evolutionary Change in Prehistoric Weaponry », *Journal of Archaeological Method and Theory*, 5-4 : 345-408.
- HUTCHINGS K.W., 2011. « Measuring Use-related Fracture Velocity in Lithic Armatures to Identify Spears, Javelins, Darts, and Arrows », *Journal of Archaeological Science*, 38 : 1737-1746.
- JUNKMANN J., 2013. *Pfeil und Bogen, von der Altsteinzeit bis zum Mittelalter*, Ludwigshafen, A. Hörnig, 413 p.
- LECAILLE J.-M. & MENU J.-P., 1985. *Chasse à l'arc*, Paris, Gerfaut club, 157 p.
- LEPERS C., 2005. « Arcs et flèches, histoire et savoir-faire », *Bulletin de la Société royale belge d'Études géologiques et archéologique Les Chercheurs de la Wallonie*, Hors-série no 1, 216 p.
- LEPERS C., 2011. « Réflexions sur l'utilisation du propulseur », *Bulletin de la Société royale belge d'Études géologiques et archéologique Les Chercheurs de la Wallonie*, 49 : 105-131.
- LEPERS C., 2012. *Comparer et quantifier des reproductions d'arcs*, in *Actes du colloque Arcs et flèches, Vers une meilleure connaissance et conservation des collections ethnographiques extra-européennes d'archerie, 6 avril 2012*, Musée Muséum départemental des Hautes-Alpes, p. 38-49.
- MCEWEN E., MILLER R. & BERGMAN C., 1991a. « Early Bow Design and Construction », *Scientific American* 264 : 76-82.
- MCEWEN E., MILLER R. & BERGMAN C., 1991b. « La conception et la fabrication des arcs anciens », *Pour la Science*, 166 : 74-81.
- SISK M.L. & SHEA J.J., 2009. « Experimental Use and Quantitative Performance Analysis of Triangular Flakes (Levallois Points) Used

as Arrowheads », *Journal of Archaeological Science*, 36 : 2039-2047.

Trueflight feathers, Fletching Guide, <http://www.trueflightfeathers.com/guide.htm>.

WAGUESPACK N.M., TODD A.S., DENOYER A., DALLOW A., SAVAGE A., HYNEMAN J. & TAPSTER D., 2009. « Making a Point: Wood- versus Stone-tipped projectiles », *Antiquity*, 83 : 786-800.

WEBER M.-J., 2009. *Fabrication and Use of Hamburgian Shouldered Points: New Data from Poggenwisch and Teltwisch 1 (Arhensburg Valley, Schleswig-Holstein Germany, in Palethno, Projectile Weapon Elements from the Upper Palaeolithic Proceedings of Session C83, UISPP XV World Congress Lisbon 4-9 September 2006)*, p. 98-132.

Adresse de l'auteur :

Christian LEPERS
Rue Devant Sauvenière, 3
B-5580 Rochefort
christian.lepers@yahoo.fr