EXPÉRIENCE DE TIR À LA FONTAINE DE LOULIÉ

Commune de Saint-Denis-lès-Martel (Lot)

par Jean-Pierre Girault

Avec la collaboration : de Pierre Billiant, Pascal Lavaud, François Moser, Pascal Mora

Sommaire

1- Tirs depuis les falaises de Loulié, vers le camp Romain

1-1 - But
1-2 - Lieu
1-3 – Préliminaires de l'expérience
1-4 – Fabrication des armes employées
    1-4-1 - Les arcs
    1-4-2 - Les flèches
1-5- Déroulement de l'expérience du 30 janvier 1998
    1-5-1 - Séance du matin, organisation, conditions atmosphériques
    1-5-2 - Lancers de galets
    1-5-3 - Tirs à la fronde
    1-5-4 - Séance de l'après-midi, organisation
    1-5-5 - Première volée de flèches
    1-5-6 - Deuxième volée de flèches
1-6- Déroulement de l'expérience du 25 février 1998
    1-6-1 - But, organisation et conditions atmosphériques
    1-6-2 - Lancers de galets
    1-6-3 - Tirs à la fronde
    1-6-4 - Tirs à l'arc
1-7- Déroulement de l'expérience du 19 novembre 1998
1-8 - Notion sur les trajectoires, formules mathématiques
1-9 - Calculs divers correspondant aux essais réalisés
1-10 - Commentaires

2- Tirs depuis la tour romaine vers le camp gaulois

2-1 - But
2-2 - Lieu
2-3 - Conditions atmosphériques.
2-4 - Figurants Romains, lieu de campement
2-5 - Fabrication des armes employées
2-6 - Essais réalisés
    2-6-1 - Tir à l'arc
    2-6-2 - Tir à la catapulte
2-7 - Commentaires

3 - Conclusions

Plans

Plan n° 1 : Résultat des tirs réalisés en 1998 depuis les falaises.
Plan n° 2 : Résultat des tirs réalisés en 2006 depuis la tour romaine.

Photos

Photos n° 1 à 2: Expérience de tirs en 1998, zones de tir n° 1 et 2.
Photos n° 3 à 6 : Expérience de tirs à la fronde en 1998.
Photos n° 7 à 11 : Expérience de tirs à l'arc 1998.
Photos n° 12 à 14 : Expérience de tirs à l'arc en 2006, depuis la tour romaine.
Photos n° 15 à 18 : Expérience de tirs à la catapulte en 2006, depuis la tour romaine.
Photos n° 19 à 22 : Expérience de tirs en 2006, photos diverses.
Photos n° 23 à 25 : Expérience de tirs en 2006, les projectiles.
Photos n° 26 à 29 : Expérience de tirs à l'arc 2006, Public et élus.

Participants aux différents essais

Participants 30 janvier 1998
Concepteur du projet, coordinateur de l'expérience : Jean-Pierre GIRAULT.
Propriétaire du terrain, intervenant sécurité : Charles Aussel
Observateurs : Pierre Billiant et François Moser.
Observateur et rapporteur : Guy Maynard.
Témoins d'expériences : Jean Marie et Pierre Courteix, Dominique Lavaud.
Intervenant sécurité : Louis Genot.
Lanceurs : Pascal Lavaud (taillandier) et François Moser (conservateur au musée Labenche de Brive).
Aide lanceur : Brice Lavaud.

Participants le 25 février 1998
Concepteur du projet, coordinateur de l'expérience : Jean-Pierre Girault.
Observateurs : Bernard du Pradel.
Rapporteur : Marie-France Biberson.
Chronométreur et observateur : Lieutenant-Colonel Jean-Pierre Biberson
Intervenant sécurité : Louis Genot, Charles Aussel
Lanceurs : Pascal Lavaud et François Moser.
Intendance : Héliane Girault.

Participants 19 novembre 1998
Concepteur du projet, coordinateur de l'expérience : Jean-Pierre Girault.
Observateur : Bernard du Pradel.
Rapporteur : Marie-France Biberson.
Chronométreur et observateur : Lieutenant-Colonel Jean Pierre Biberson
Intervenant sécurité : Charles Aussel, Bruneau Maureille, Pascal Murail, Bernard du Pradel.
Tireur à l'arc : Pascal Mora.

Participants 17 juin 2006
Organisateur et financement du projet : L'Association Uxellodunum Puy-d'Issolud, responsable Roger Mialet.
Concepteur du projet, coordinateur de l'expérience : Jean-Pierre GIRAULT.
Concepteur des armes reconstituées : Pascal Lavaud.
Autorités politiques : Francis Lhermitte (Sous-Préfet de Gourdon), Christian Delrieu (conseiller général), Jean-Claude Requier (conseiller général), Hugues du Pradel (maire de Vayrac), Bertrand Lacarrière (maire de Saint-Denis-lès-Martel), Pierre Prangère (maire de Saint-Michel-de-Bannières).
Fermeture route de Loulié et information voisinage : Bertrand Lacarrière, Hugues du Pradel
Balisage Uxellodunum, Fontaine de Loulié : Guy Flaviat, Georges Couret.
Intervenants pour les tirs : Pascal Lavaud.
Intervenants sécurité : Hugues du Pradel, Jean-Claude Eyma, Michel Espéret, Pierre Guillet, Jacques Goude, Clarisse Lemonnier, Roger Bousquet, Daniel Planche, Ludovic Antoine, Louis Genot, Bertrand Lacarrière, Pierre Arnaud Lelidec, Christian Missoty, Catherine Simon.
Observateur et rapporteur : Michel Daubet.
Ordre des tirs et chronométreur : Jean-Pierre Biberson.
Témoins d'expérience et observateurs : Charles Aussel, Marie-France Biberson, Pierre Billiant, Muriel Fily, Patrick Lascaux, Pierre Arnaud Lelidec, Merrick Ireland, Céline Majorel, Roger Mialet, Virginie Mousset, Hervé Padirac, Roger Perrier, Guillaume Renoux, Catherine Simon.
Relevés des impacts avec report sur plan : Jean-Claude Bonneval, Michel Carrière, Pierre Billiant, Catherine Simon.
Relevés des angles et enfoncement des flèches : Pierre Billiant, Michel Carrière, Muriel Fily, Jean-Pierre Girault, Virginie Mousset.
Études des déformations des flèches et des fers de trait : Francis Dabosi et Guillaume Renoux.
Photographes professionnels : Claude Marty et son équipe, réalisation d'un diaporama sur les essais
Liaison organisation-photographes, accueil presse : Bernard Dehan, Roger Perrier.
Photographes amateurs : Christian Missoty, Francine Bonati, Bernard Dehan, Merrick Ireland.
Intendance : Monique Bizot, Francine Bonati, Denyse Combret, Monique Couret, Héliane Girault, Suzy Ireland, Jean-Claude Lachièze, Dominique Lascaux, Lili Prangère, Sophie Vieillefosse.
Abattage, nettoyage des branches, curage du ru, nettoyage du site : Entreprise Bayral, entreprise Jean Claude Lachièze, Jean-Claude Bonneval, Georges Couret, Patrick Lascaux, Roger Mialet, Christian Missoty.

Participants divers au Projet
Conseils et documentation : Colonel Jean Bergue et le Lieutenant-Colonel Jean-Pierre Biberson.
Études mathématiques sur les trajectoires : Philippe Chem (professeur de Physique), Thong Dang (professeur de Mathématique) et Christian Biberson (étudiant).

1- Tirs depuis les falaises, vers le camp Romain (plan n° 1)

1-1 - But

Au moyen d'armes reconstituées selon ce qui pourrait être les méthodes antiques, pratiquer des lancers et des tirs sur le site de la fontaine de Loulié, où un combat opposa Gaulois et Romains. Déterminer les portées, les zones d'insécurité. Appréhender les qualités de vol des projectiles et leur efficacité.

1-2- Lieu

Un poste de tir a été aménagé sur le sentier conduisant de la source de Loulié à la Combe noire (plateau du Puy d'Issolud) dans la section où ce sentier court horizontalement au pied du niveau supérieur des falaises, et en surplomb par rapport aux divers exutoires de la source. Cette section est caractérisée par un tracé presque rectiligne. Cependant quelques avancées rocheuses ménagent des balcons en surplomb aisément utilisables par d'anciens défenseurs de l'oppidum. Toutefois, ils n'ont pas été utilisés pour l'expérience en raison des arbres poussant sur les pentes, obstruant ou limitant la vue sur l'objectif. En revanche, en face d'une partie légèrement en retrait, une trouée avait été opérée dans les arbres afin de dégager l'angle de tir.

1-3 – Préliminaires de l'expérience

- Un nettoyage général du secteur de la source a été réalisé durant l'été 1997 avec l'aide de divers bénévoles, associations et scouts de France. Cette action a entraîné un dégagement spectaculaire des vestiges des fouilles Laurent-Bruzy, interrompues peu avant la dernière guerre mondiale et restées en l'état. Des retenues d'eau que nous avons, par facilité, qualifiées de lacs, se sont naturellement formées en aval de la source lorsque les grands tas de déblais ont fait obstacle à l'écoulement de l'eau. Ces lacs (nous continuerons à utiliser ce terme dans le rapport) s'étirent perpendiculairement à la pente sur une largeur maximale d'environ 4 m et une longueur d'environ 20 m pour celui de droite (en venant de la source) et de 15 m pour celui de gauche (en venant de la source).

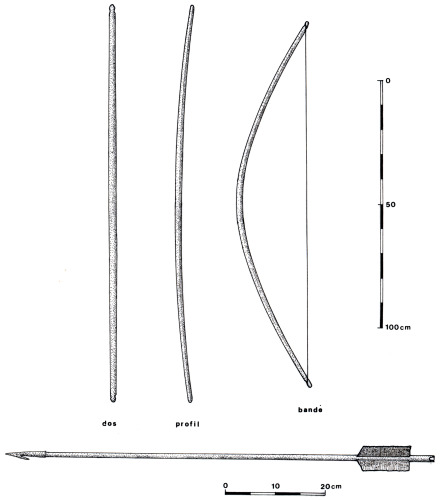
- Une deuxième séance de nettoyage est intervenue durant l'automne 1997. Elle a affecté principalement l'espace s'étendant entre le pied de falaise et le sentier conduisant à la source, et dont le prolongement conduit au poste de tir dont il a été question plus haut. Parmi les actions ciblées de ce nettoyage, l'abattage de quelques arbres est intervenu afin de ménager un couloir de tir.

- Remarque : on se souviendra que pour des raisons militaires évidentes, les flancs des oppida étaient entièrement dépourvus d'arbres, et peut-être aussi de végétation arbustive.

1-4 - Fabrication des armes employées

1-4-1 - Les arcs

Dimensions. Essences employées



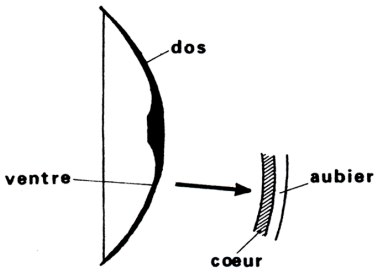
Pour réaliser de bonnes performances, la longueur totale d'un arc simple doit s'établir entre 1,50 et 1,80 m, ce qui pour une allonge moyenne de 0,71 m donnera un rapport longueur de l'arc / allonge variant 2,11 à 2,53 pour 1. Signalons toutefois que l'efficacité de l'arc diminue rapidement lorsque ce rapport dépasse 2,3 pour 1.

De nos jours, on emploie de préférence soit des essences traditionnellement utilisées dans le passé comme l'if (*Taxus baccata*), le frêne (*Fraxinus)* soit les essences qui ne poussaient pas en Gaule du 1er siècle avant J.-C. : le catalpa, le robinier faux acacia (*Robinia pseudoacacia*) et le châtaignier (*Castanea sativa*).

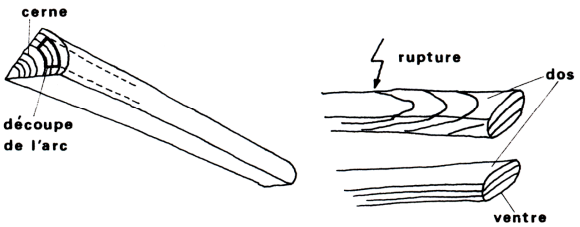
Pour un arc de type *"long bow"* non renforcé par des tendons, la longueur se calcule en prenant 2 fois l'allonge du tireur augmentée de 10 %.

Temps de fabrication

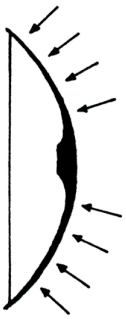
- Le séchage : la meilleure solution consiste à le faire sécher une fois fendu en "billette", d'environ 10 cm de diamètre, pendant au minimum 3 à 4 ans. Il faut compter 1 cm par an.

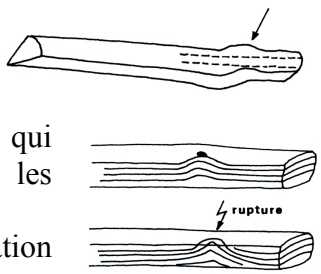


- La découpe : avec un peu d'expérience et en suivant les règles de l'art la réussite est pratiquement assurée. Suivant les bois, on utilise seulement le cœur, ou bien le cœur et une couche d'aubier (sur le dos de l'arc). L'élasticité supérieure de l'aubier permet de mieux résister aux tensions sur le dos de l'arc (cas de l'if par exemple).
Il faudra s'efforcer :



➨ De suivre un cerne de bois (et un seul) sur toute la longueur du dos de l'arc même s'il n'est pas parfaitement droit. C'est pour cela, qu'il est préférable de fendre le bois, car la fente suit le fil. Cependant si l'on veut un arc bien droit, on peut le tailler avec le risque de le fragiliser un peu.





➨De bien travailler les nœuds, car ils fragilisent les branches. On limite ce phénomène en respectant les cernes, même aux abords des nœuds, ce qui produit un petit renflement sans influence sur les performances de l'arc.

L'arc est réalisé avec une plane. Sa réalisation

n'aboutit qu'une fois sur cinq tant le façonnage est délicat. Cette dernière phase requiert 5 à 8 heures de travail.

L'absence de poignée augmente le phénomène de vibration de l'arc. Un arc performant doit avoir également les branches légères qui travaillent de façon homogène.

- La corde : Son élasticité doit être réduite au maximum. D'où l'utilisation, de préférence de fibres végétales (lin, chanvre) ou animales (tendon, soie…).

1-4-2- Les flèches

Caractéristiques des flèches employées pour les essais

Les flèches ont été fabriquées par Pascal Lavaud. La longueur totale fer plus hampe est de 0.85 m à 0,90 m. Le poids varie de 40 à 55 g, la moyenne s'établissant autour de 50 g.

La hampe

Le bois employé est du cornouiller ou du frêne. D'autres essences, présentant de bonnes qualités peuvent aussi être employées comme le bouleau et le tilleul.

La hampe mesure environ 0,80 à 0,85 m, avec une section côté pointe de 0,7 à 1 cm, et côté encoche de 1 à 1,3 cm. L'encoche taillée directement dans le fût et perpendiculairement au fil du bois est profonde de 1 cm, large de 0,35 à 0,4 cm.

Fabrication :

Le bois doit avant tout être séché. Si ce séchage s'effectue à l'air libre une période de 3 mois est nécessaire. Mais, cette opération peut-être raccourcie par une exposition au feu de 5 à 10 minutes. Ensuite le redressement des tiges s'obtient par un passage au feu d'environ 2 à 3 minutes seulement.

La réalisation de l'encoche demande 5 à 10 minutes de travail.

La hampe une fois appointée d'un côté est simplement introduite en force dans la douille de la pointe de flèche.

L'empennage

Généralement en plume, il peut aussi être réalisé en matière végétale (par exemple feuille de roseau etc..).

Les flèches utilisées pour les essais présentaient des empennages triples, en plumes d'oies ou de poules. Les plumes ont été choisies de même forme, de même gabarit, après avoir été prélevées sur le même flanc de l'oiseau. L'empennage une fois en place doit être retaillé afin d'obtenir une symétrie et une régularité nécessaires à de bonnes qualités du vol de la flèche. Il mesure de 9 à 14 cm, et a été fixé sur la hampe à environ 5 cm de l'encoche. Sa réalisation, taille des plumes, encollage, demande 25 à 30 minutes d'intervention.

La pointe de flèche

La longueur d'une pointe de flèche varie de 7 à 8 cm. La barbelure mesure 2 à 3 cm. La section de la douille est de 0,8 à 1,2 cm et sa profondeur de 2 à 3 cm. Le poids d'une pointe de flèche droite varie de 9 à 12 g et celui d'une pointe de flèche à une barbelure de 12 à 16 g.

La réalisation d'une pointe de flèche droite demande au taillandier 3 à 4 minutes, avec un maximum de 10 flèches à l'heure (du fait de la fatigue). Pour une pointe de flèche à une barbelure,

le temps nécessaire est à peine plus important : 4 à 6 minutes, avec un maximum de 7 fers de flèche à l'heure.

Les flèches

La longueur optimale des flèches modernes se calcule en mesurant l'allonge du tireur que l'on augmente de 1" 1/2 soit environ 4 cm.

Pour des performances optimales la pointe de la flèche ne doit pas trop dépasser l'arc.

Le diamètre du fût de la flèche (donc de sa rigidité) doit être adapté à la performance de l'arc. Pour savoir si le fût est bon, on fait des essais. On tire pour cela une flèche non empennée à environ 15 mètres de la cible.

Résultats - pour un droitier : tir à droite → hampe trop souple ;
tir à gauche → trop rigide.

Un empennage important freine les flèches.

Pour un fût non parfaitement cylindrique, l'extrémité de plus gros diamètre doit être orienté côté pointe pour que le centre de gravité reste dans la partie antérieure de la flèche.

1-5- Déroulement de l'expérience du 30 janvier 1998

1-5-1- Séance du matin, organisation, conditions atmosphériques

Conditions atmosphériques.

Le ciel était dégagé. La température avoisinait - 4°C. Le vent était nul. La pente dans laquelle devait se dérouler l'expérience était gelée, ou peu s'en fallait, tandis que le versant opposé (Sous-Termes) était ensoleillé. Les essais ont commencé à 9 h 30.

1-5-2- Lancer de galets

Une cinquantaine de projectiles avaient été au préalable peints en rouge orangé fluo et marqués d'un numéro pour les identifier. Ces pierres avaient été avant peinture pesées et mesurées. Leur collecte avait été faite suivant les critères de forme et taille correspondant aux galets trouvés sur les pentes de divers *oppida*.

Le lanceur les a choisies sur place, selon leur gabarit, pour effectuer des tirs à la main ("grosses" pierres) et à la fronde ("petites" pierres).

La première série commencée à 10h 11 ne comportait que des galets lancés à la main. Les pierres étaient choisies au fur et à mesure par le lanceur sans autre souci que le désir d'employer un galet bien adapté, et donc sans tenir compte d'une quelconque façon de la numérotation des projectiles.

Le lanceur est droitier, ce qui a influé d'une manière classique sur les déviations de trajectoire. Si ces déviations sont peu perceptibles pour les lancers à la main, on verra qu'il n'en est pas de même pour ceux opérés avec la fronde.

Tous les tirs ont été réalisés à longue distance sans recherche de précision, l'angle de tir pouvant varier de 20 à 45 degrés.

CONSTATATIONS AU LANCER	
Numéro par ordre de lancer	**Observations du poste de tir**
44	trajectoire vers la gauche. Impact au bout du petit lac
23	trajectoire rectiligne. Impact extrémité du grand lac.
30	trajectoire rectiligne. Impact à droite du grand lac
36	trajectoire rectiligne. Impact sur le talus, rive gauche du lac.
39	trajectoire rectiligne. Impact au bord du lac, rive gauche
40	trajectoire vers la gauche. Impact sur le talus central.
33	trajectoire défectueuse et raccourcie. Impact au début du lac de droite
41	trajectoire rectiligne. Impact sur un petit promontoire, côté gauche
37	mêmes observations que n° 41
43	trajectoire raccourcie. Impact avant le lac de droite
45	trajectoire rectiligne. Impact dans le lac, derrière le petit promontoire
29	trajectoire rectiligne. Impact sur l'île. Lancer sans élan. Galet non retrouvé.
4*	trajectoire rectiligne. Impact au milieu de la grande île. Lancer sans élan. Galet non retrouvé
34	trajectoire nettement déviée vers la droite. Lancer sans élan
32*	trajectoire rectiligne. Impact dans la première partie du petit lac (à gauche). Lancer sans élan
31*	trajectoire rectiligne. Impact à gauche sur talus. Lancer sans élan. Galet non retrouvé.

PERFORMANCES DES PROJECTILES						
N° d'identi-fication	**Nature du galet**	**Section en cm**	**Longueur en cm**	**Poids en g.**	**Distance atteinte en m**	**Dénivelé par rapport au Z_0**
23	basalte	5 x 5,9	2,6	165	84	41
29	quartz	4,7 x 6,1	3,8	125	85	39
30	granit	4,5 x 6,8	3,6	160	77	41
33	granit	5,8 x 5,8	4,6	220	66	40
34	gneiss	5,4 x 6,2	3,7	160	82	40
36	schiste	6,5 x 5,5	4,3	230	76	41
37	granit	6,4 x 6,7	4,5	285	69,5	40
39	basalte	5,5 x 7,8	2,9	230	75,5	41
40	granit	5,4 x 6,2	3	145	79	40
41	granit	6,7 x 8,4	4,6	330	70	40
43	schiste	6,5 x 6,5	4,8	265	64,5	39
44	granit	5,6 x 6,8	4,1	200	75,5	41
45	granit	6,8 x 8,9	3,5	300	72	40

1-5-3- <u>Tirs à la fronde</u>

La deuxième série de tirs, consacrée à la fronde, a commencé à 11h 30. Elle avait été précédée d'un lancer d'essai avec une pierre sans numéro, l'expérimentateur prenant bien soin de contrôler avant toutes choses sa force et la direction du projectile. En effet, la puissance de la fronde nous paraissait *a priori* une source plus importante de danger. Nous avions une vague opinion sur la portée, mais seule l'expérimentation nous permettrait de juger de l'importance de la zone battue. Nous devions prendre un soin particulier à ne pas lancer vers la gauche, où se trouve une maison actuellement inoccupée.

Après que la bourse ait reçu le projectile maintenu en équilibre instable par le resserrement de la poche de cuir, l'ensemble est mis en rotation rapide selon un axe quasiment vertical. Lorsque le lanceur estime que la vitesse maximale est atteinte, c'est-à-dire 3 à 4 tours, il lâche l'une des brides, ce qui entraîne la libération de la pierre. Mais ce mouvement s'opère au moyen d'un léger mouvement du poignet et de la main qui provoque souvent un déplacement de l'avant-bras vers la

gauche pour un droitier, ou l'inverse pour un gaucher. L'angle de départ du projectile a pu varier de 20 à 45 degrés.

L'habileté des frondeurs professionnels de l'Antiquité devait être en partie due à la prise en compte de cet élément commun que seule une attention particulière peut compenser, par exemple grâce à une correction de visée.

CONSTATATIONS AU LANCER

Numéro	Observations du poste de tir
24*	Lancer à l'encontre des craintes exprimées par le lanceur en ce qui concerne la maison. Déviation très nette vers la gauche. Heureusement, l'échauffement s'effectue sans casse, car le projectile tombe à proximité du bâtiment. Mais tous les lancers s'en trouveront affectés, l'opérateur agissant "petit bras" pour éviter les dégâts.
18*	Trajectoire vers la droite. Impact dans un peuplier
14*	Lancer manqué. Impact sur la grande île
16	Nouvelle déviation vers la maison. Impact aux alentours
1*	Trajectoire dans l'axe. Impact ?
13	Trajectoire vers la gauche. Impact estimé au delà de la maison
15	Trajectoire vers la gauche. Impact à droite de la maison
5*	Trajectoire vers la gauche. Impact estimé au delà de la maison
12*	Trajectoire dans l'axe. Impact côté droit de la maison.
21	Trajectoire un peu vers la droite. Impact dans la noyeraie
28	Mêmes observations que n° 21
19	Trajectoire dans l'axe. Impact dans la noyeraie en bordure de route
17	Trajectoire dans l'axe. Impact à droite de la maison.

* *projectiles non retrouvés*

PERFORMANCES DES PROJECTILES

N° d'identification	Nature du galet	Section en cm	Longueur en cm	Poids en g.	Distance atteinte en m	Dénivelé par rapport au Z_0
13	basalte	3,7 x 5,4	2,6	85	151	63
15	quartz	4 x 5	3,7	85	109	49
16	granit	3,6 x 4,4	3,6	70	106	48,5
17	gneiss	4,9 x 4,9	2,9	90	105	48,5
19	granit	4,5 x 4,6	2,9	75	152	63,5
21	granit	3,9 x 4,7	3	85	145	60
28	granit	3,3 x 4,6	4	85	154	63,5

La séance de tir a été conclue avec une courte expérience de lancer avec une fronde à manche *(fustibalus)*. Le galet est tombé dans le grand lac. Les essais ont été abandonnés suite aux difficultés de maniement.

L'appréhension causée par le risque d'atteindre la maison a affecté les performances du lanceur. Les distances atteintes sont certainement moindres par rapport à ses réelles capacités.

Les tirs ont été suivis d'une recherche collective des projectiles dans les zones supposées les avoirs reçus. En fait, malgré un râteau dans le pré sous la maison, nous n'avons retrouvé au total que 7 projectiles sur 13 lancés. Amolli par plusieurs semaines de pluie, maintenu dans son état d'humidité par le voisinage de la source, le sol était suffisamment meuble pour "avaler" des projectiles arrivant à grande vitesse après un tir d'un point élevé.

La séance de la matinée est terminée vers 12 h 45.

1-5-4- Séance de l'après-midi

Cette séance, commencée à 14 h 35, est entièrement consacrée au tir à l'arc. Il sera effectué deux séries de tirs à partir de deux zones surplombant la fontaine mais à des altitudes différentes. La visibilité est excellente et la température est d'environ 13°.

Caractéristiques des arcs employés pour les essais

Deux arcs ont été utilisés :

Le premier, en acacia, apporté par F. Moser, a déjà servi pour l'initiation au tir, lors de la journée foraine du 29/9/97 à la maison néolithique des Vergnes à Brive.

Le second fabriqué par P. Lavaud est en acacia. C'est un arc simple, sans poignée, avec des coches situées à environ 3 cm de l'extrémité des branches pour fixer la corde. D'une longueur de 1,60 m, ce qui lui donne un rapport longueur de l'arc / allonge de 2,25 pour 1. Il présente en son milieu une section ovale de 3 cm de large et de 2,5 cm d'épaisseur. Arc légèrement déflexe, il possède une fois bandé une hauteur de 1,48 m.

Sa puissance estimée est de 40 livres.

Remarques : L'absence de poignée accentue les vibrations transmises à l'archer et le rend moins confortable lors du tir.

1-5-5- Première volée de flèches

La première volée qui comporte 10 lancers est effectuée à partir du poste de tir des pierres de jet (zone de tir n°1). L'objectif de référence est un bouquet de bambous, au bord du ru, au niveau de la maison.

Le tir commence à 15h 15. A noter que l'utilisation de l'arc de F. Moser s'est limitée à une tentative. Le bois a immédiatement cassé. Dessiccation ? Mauvais traitement lors de l'animation évoquée ?

L'archer P. Lavaud a tiré en utilisant une préhension méditerranéenne et une protection à l'intérieur des doigts afin d'éviter une blessure.

La vitesse d'arrivée empêche toute détection sonore, sinon en cas d'impact sur un objet provoquant une onde sonore, comme un tronc, une palissade.

L'angle de tir a pu varié de 20 à 45 degrés.

ARC - PREMIÈRE SÉANCE DE TIR

Numéro d'ordre	Observations	Poids du fer en g	Poids total en g	Distance atteinte en m	Dénivelé par rapport à Z0
1	Impact dans les bambous. Tige de 2 cm de diamètre transpercée	11	40	84 m	40,5
2	Impact près d'un pommier. Enfoncement dans la terre : 13 cm	15	45	82 m	40,5
3	Impact dans le verger. Enfoncement : 18 cm	11	40	98 m	43,5
4	Impact dans le verger. Pointe détachée. A plat.	15	50	88 m	43,5
5	Impact dans le verger. Position presque verticale. Enfoncement : 9 cm	15	45	86 m	43,5
6	Impact dans le verger. Position presque verticale. Enfoncement : 13 cm	15	55	81 m	42
7	Impact sur une souche sur la rive droite du ru. Fer profondément engagé dans le bois. **Extraction avec un outil.**	15	50	80 m	41
8	Impact dans le verger. Position presque verticale. Terre meuble. Enfoncement : 20 cm	15	55	87 m	43,5
9	Côté gauche du ru. Position presque verticale. Terre de remblai. Enfoncement 5 cm	15	55	79 m	40,5
10	Impact au bord droit du ru. Position presque verticale. Enfoncement : 13 cm	13	45	97 m	44,5

Le dénivelé moyen est d'environ 42 m.

1-5-6- Deuxième volée de flèches

La deuxième volée a été tirée d'un autre poste de tir (zone de tir n°2). Pour mesurer l'importance du dénivelé sur la portée des flèches, les lanceurs se sont rendus sur le bord de la

falaise, à environ 8 m au-dessus du poste précédemment utilisé, et en décalage de 105 mètres vers le nord (axe de la vallée)[1].

L'angle de tir varie de 30 à 45 degrés et le dénivelé moyen est de 49 m

ARC - DEUXIÈME SÉANCE DE TIR		
Numéro d'ordre	**Observations**	**Distance atteinte**
11	Impact dans le verger. Position presque verticale. Enfoncement : 15 cm. Cette flèche était dépourvue de pointe métallique.	112 m
12	Impact dans le verger. Position inclinée. Enfoncement : 10 cm. Tir par F. Moser qui a visé le bouquet de bambous voisin	120 m
13	Impact dans le verger. Position inclinée. Enfoncement : 10 cm. Tir par F. Moser qui a visé le bouquet de bambous voisin	128 m
14	Impact dans le verger. Position verticale.	126 m
15	Impact dans le verger. Position inclinée. Enfoncement : 15 cm	112 m
16	Impact dans le verger. Position inclinée. Enfoncement : 18 cm	127 m
17	Impact dans le verger. Position inclinée. Enfoncement : 8 cm	130 m
18	Impact près de la route, partie inférieure du verger. Position presque verticale. Enfoncement : 17 cm	158 m
19	Impact à côté des bambous. Cassée en 2 au moment de l'impact. L'extrémité côté pointe s'est enfoncée de 15 cm	131 m
20	Impact dans le roncier, rive gauche du ru. Position presque verticale. Impossibilité de mesurer l'enfoncement.	140 m

1-6- Déroulement des essais du 25 février 1998

1-6-1- But, organisation et conditions atmosphériques

But

Suite au premier essai, nous avons effectué des tirs supplémentaires pour avoir de nouvelles données et contrôler les calculs mathématiques.

- Angle de tir voisin de 45 degrés.
- Mesure de temps correspondant à l'apogée maximum.
- Mesure du temps total.

Les tirs ont été effectués de 14 à 17 heures, depuis le chemin, à 10 mètres au nord de la source tarie, sous falaise, au même endroit que les premiers essais du 30 janvier (zone de tir n° 1).

Le lieutenant-colonel Jean-Pierre Biberson a dirigé les essais et effectué les mesures de temps au chronomètre. Tous les tirs ont été réalisés par Pascal Lavaud.

Conditions atmosphériques

Le ciel était dégagé. La température avoisinait 15° C. Le vent d'ouest était léger et face au tireur.

[1] - Sauf deux projectiles, toutes les flèches ont été tirées par P. Lavaud.

1-6-2- Lancers de galets

À l'inverse des essais du 30 janvier, le choix des projectiles a été réalisé sur le site de Loulié par le lanceur : pierres de forme ovale, bonne tenu dans la main etc...

PERFORMANCES DES PROJECTILES								
Numéro d'identi-fication	**Nature du galet**	**Section en cm**	**Longueur en cm**	**Poids en g.**	**Temps apogée en sec.**	**Temps total en sec.**	**Distance atteinte en m**	**Dénivelé par rapport au Z_0**
50	quartz	1,6 x 2,7	3,2	80	1,6	5	77	41
51	quartz	1,6 x 2,6	3,4	90	1,7	5	80	40,5
52	basalte	1,8 x 3,4	4,4	130	1,7	5	81	41
53	quartz	2,1 x 4,2	5	200	1,5	4,8	73	41
54	granit	1,8 x 2,7	4,6	120	1,5	5	75	37,5
55	quartz	2,6 x 4,3	5,1	240	1	4,5	63	36,5
56	granit	2,6 x 4,6	7,3	340	1	4,5	63	40,5
57	basalte	1 x 3,5	4,5	100	1,7	5	81	39
58	basalte	1,1 x 3,8	5,1	130	1,7	5	80	39
59	gneiss	2,6 x 3,6	5,1	190	1	4	59	39,5

1-6-3- Tirs à la fronde

Pour des raisons de sécurité, il n'a pas été possible de tirer à la fronde vers l'ouest. Le tir a donc été effectué depuis les lacs vers les falaises. Le but recherché était de faire des mesures de temps pour vérifier la validité des calculs de la vitesse initial Vo. Toutes les pierres tirées ont touché la falaise.

$$Vo = 2\pi R / t$$

t : temps du dernier tour de la corde
R : rayon de la fronde, 1,05 m.

FRONDE - MESURE DE TEMPS								
Numéro d'identi-fication	**Nature du galet**	**Section en cm**	**Longueur en cm**	**Poids en g.**	**nombre de tours**	**Temps total en sec.**	**Temps du dernier tour (*)**	**Vo en m/s**
60	granit	3,3 x 3,4	4,3	50	3	1,5	0,2	33
61	granit	2,8 x 4	5,3	80	3	1,5	0,2	33
62	basalte	3,1 x 4,4	6,2	120	3	2	0,2	33
63	basalte	3,7 x 4,3	5,7	115	3	2	0,2	33
64	quartz	4,4 x 5,6	7,3	270	3	2,5	0,25	26

(*) - Le dernier tour étant de l'ordre de 0,2 s, la mesure au chronomètre est approximative.

1-6-4- Tirs à l'arc

ARC - TROISIÈME SÉANCE DE TIR						
Numéro d'ordre	**Observations**	**poids du fer en g**	**poids total en g**	**Temps total en sec.**	**Distance atteinte en m**	**Dénivelé par rapport à Z0**
21	Fer de flèche à une barbelure. Impact dans le verger. Enfoncement dans la terre : 15 cm	13	45	6	117	47
22	Fer de flèche droite. Impact dans le verger. Enfoncement dans la terre : 15 cm	15	50	6	122,5	50,9
23	Fer de flèche à une barbelure. Impact dans le verger. Enfoncement : 15 cm	11	45	5,5	112,5	46,5
24	Fer de flèche à une barbelure. Impact dans le verger. Enfoncement : 17 cm	13	45	6	121	48

Toutes les flèches sont à une barbelure, sauf la flèche n° 24 qui est droite et à section carrée.

1-7- Déroulement de l'expérience de tir du 19 novembre 1996

Conditions atmosphériques

Le ciel était dégagé. La température à 11h 30 avoisinait 5° C, pas de vent.

Essais n°1

Le premier essai a été effectué avec un arc *"long bow",* en bois exotique Brésilien (Pao Amorello) renforcé avec des tendons. Sa puissance est de 40 livres et sa longueur de 1,72 m.

La flèche réalisée par Pascal Lavaud comporte une hampe en noisetier et un empennage en plumes de poule. L'extrémité est munie d'un fer à une barbelure de 12 g. Le poids total de la flèche est de 47 g.

Le tir a été effectué à 11h 30, depuis la zone de tir n°1, en direction du massif de bambous, parcelle 176. La distance atteinte est de 120 m, le dénivelé d'environ 51 m et l'enfoncement du fer dans le sol gelé de 9 cm.

Essais n°2

Il a été réalisé avec un arc moderne, d'une puissance 50 livres et d'une longueur 1,62 m.

La flèche comporte un fût en bambou, un empennage en plumes de dinde collées et maintenues par des tendons. L'encoche réalisée dans le fût est renforcée par du tendon. L'extrémité est munie d'une pointe de flèche à une barbelure de 12 g (réalisé par Pascal Lavaud). Le poids total de la flèche est de 38 g.

Le tir a été effectué à 11h 35, depuis la zone de tir n°1, en direction du massif de bambous, parcelle 176. La distance atteinte est de 132 m, le dénivelé d'environ 53 m et l'enfoncement du fer dans le sol gelé de 8 cm.

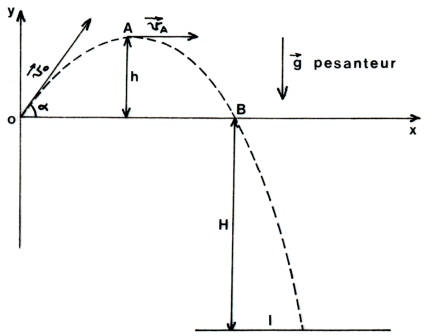
1-8 - Notes sur les trajectoires

Lancez un projectile du haut d'un endroit élevé, quelle que soit l'obliquité choisie, le jet, affectera la forme d'une parabole.

La hauteur atteinte dépend de l'inclinaison du jet, la courbe tangente à toutes ces paraboles est elle-même une parabole. Quelle que soit l'obliquité du jet aucun projectile ne pourra dépasser cette courbe qui porte le nom de parabole de sûreté. La distance maximale atteinte correspond à l'angle d'inclinaison de 45 degrés. C'est l'amplitude du jet.

Toutes les lois, concernant la pesanteur, ne sont exactes que pour les chutes d'objets dans le vide. À l'air libre, il faut tenir compte de la résistance de l'air qui produit des frottements en rapport avec les volumes et les profils. Lors de la présente expérimentation, les projectiles n'étaient pas assez volumineux pour que cette résistance soit intégrée dans les paramètres de calcul.

Équation de la trajectoire



Référentiel : Galilée. **Système étudié** : particule de masse m

Vo : vitesse initial
I : point d'impact
A : Point le plus haut de la trajectoire (apogée)
h : > 0
H : <0
Forces en présence : P le poids, on suppose négligeables les frottements

Cas n° 1, l'angle de tir est positif et le point d'impact I est < 0 ou > 0

$y = -g\,x^2 / 2\,Vo^2 \cos^2 \alpha + x \tan \alpha$ Equation de la trajectoire, formule **(1)**

$Vo = \sqrt{(-g\,x^2 / 2(y - x \tan \alpha) \cos^2 \alpha}$ **x, y dif. de 0,** Calcul de la vitesse Vo, formule **(2)**

Détermination de Vo dans le cas d'un lancer à la fronde

R : rayon en m
Vo : en m/s
t : en seconde, temps mis par la particule pour faire le dernier tour.

$Vo = 2\pi R / t$ Vitesse Vo de la pierre de fronde, formule **(3).**

Détermination des coordonnées de A

$h = 1/2\,((Vo^2 \sin^2 \alpha) / g)$ Hauteur maximum en A, formule **(4)**

$x_A = Vo^2 \sin\alpha \cos \alpha / g$ Longueur correspondante à h, formule **(5)**

Détermination de la vitesse en I : VI

$V_I = \sqrt{(V_0^2 - 2\,g\,H)}$ Vitesse au point de chute, formule **(6)**

Énergie cinétique, potentielle et totale de la particule en I (point de chute)

$E_t = 1/2\,m\,V_I^2 + m\,g\,H$ Énergie cinétique totale en I, formule **(7),** E_t en Joule (J)

Calcul de la longueur XB correspondant au Y =0

$X_B = (V_0^2 / g) \sin (2 \alpha)$ Calcul coordonnée XB, formule **(8)**

Cas n° 2, l'angle de tir est négatif et le point d'impact I est < 0

$y = (-g\,x^2 / 2\,Vo^2 \cos^2 \alpha) - x \tan \alpha$ Equation de la trajectoire, formule **(1 bis)**

$Vo = \sqrt{(-g\,x^2 / 2(y + x \tan \alpha) \cos^2 \alpha}$ **x, y dif. de 0,** Calcul de la vitesse Vo, formule **(2 bis)**

Énergie cinétique, potentielle et totale de la particule en I (point de chute)

$E_t = 1/2\,m\,V_I^2 - m\,g\,H$ Énergie cinétique totale en I, formule **(7 bis),** E_t en Joule (J)

Les formules 3 et 6 sont inchangées, les formules 4 et 5 n'existent pas (pas d'apogée de parabole), la formule 8 n'existe pas puisque O=B, même point.

1-9- Calculs divers correspondant aux essais réalisés

Pour ces calculs, nous avons utilisé le meilleur jet pour chaque type d'essai : pierre à lancer, fronde et tir a l'arc. Nous avons supposé que l'angle du jet faisait environ 45 degrés. Dans le cas de la pierre à lancer, nous avons également effectué le calcul avec un angle de 20°.

Le tableau ci-joint donne le résultat des calculs :

RÉSULTATS DES CALCULS ESSAIS des 30/1, 25/2 et 19/11 1998						
	Pierre à lancer		**Fronde**	**Tir à l'arc**		
Données utilisées	Projectile n°29, essais du 30/1/98		Projectile n° 28, essais du 30/1/98	Flèche n° 22 essais du 25/2/98	Tir n°1 Essais du 19/11/98	Tir n°2 Essais du 19/11/98
Longueur atteinte X_I en m	85	85	154	122,5	120	132
Dénivelé par rapport au tireur en m ($H = Z_0 + 1{,}60$ m)	-40,6	-40,6	-65	-54,1	-51,2	-52,9
Masse m en kilogramme	0,125	0,125	0,085	0,050	0,047	0,038
Rayon de la fronde en m			1,05			
Angle du tir en degrés	45	20	45	45	45	45
Angle du tir en radians	0,785398	0,34906	0,785398	0,785398	0,785398	0,785398
Résultat des calculs						
Vitesse initiale : Vo en m/s (formule 2)	23,75	23,69	32,59	29,10	28,73	30,40
Vitesse finale : V_I en m/s (formule 6)	36,89	36,85	48,35	43,07	42,77	44,30
Hauteur à l'apogée : h en m (formule 4)	14,38	3,34	27,07	21,57	21,03	23,56
Longueur X_A en m (formule 5)	28,76	18,38	54,15	43,15	42,06	47,12
Longueur X_B en m (formule 8) on a bien $X_B = 2\,X_A$	57,52	36,76	108,29	86,29	84,11	94,23
Temps pour atteindre l'apogée,$t = X_A / V_0 \cos \alpha$ en s	1,71	0,83	2,35	2,10	2,07	2,19
Temps pour atteindre le but, $t = X_I / V_0 \cos \alpha$ en s	5,06	3,82	6,68	5,95	5,91	6,14
Énergie totale : $Et = 1/2mV_0^2$ en J (elle est constante)	35,27	35,06	45,15	21,16	19,39	17,56
Énergie cinétique au moment de l'impact : $Ec = 1/2mV_I^2$ en J	85,06	84,85	99,35	46,37	43	37,28
Cas de la fronde : temps mis pour effectuer le dernier tour en s (formule 3)			0,20			
Vérification : $E_p = mgH$	-49,79	-49,79	-54,20	-25,21	-23,61	-19,72
Vérification : on retrouve bien $E_t = E_c + E_p$	35,27	35,06	45,15	21,16	19,39	17,56

1-10 - Commentaires

À la faveur de ces expériences, il apparaît :

♦Que les tirs dits de saturation devaient êtres efficaces et meurtriers en raison de la vitesse d'impact au sol due au dénivelé. L'exemple de la flèche n° 8 de la deuxième volée est significatif (158 m). L'archer a recherché une portée maximale en prenant un angle de visée d'environ 45° et en bandant l'arc au maximum. Le gain par rapport à la moyenne est d'environ 25 m.

♦ Que dans l'hypothèse d'une attaque appuyée par le déplacement d'une tour d'assaut sur le plan de roulement d'un *agger*, des frondeurs ou lanceurs spontanés qui auraient visé cet objectif à partir de différents postes de tir sur le sentier de pied de falaise, auraient pu toucher facilement leur cible. En outre les divers postes, auraient permis des tirs croisés toujours très meurtriers, quelle que soit l'arme utilisée.

♦ Que de ce même sentier, le fait de laisser rouler des blocs de rocher (expérience que nous n'avons pas osé pratiquer en raison de l'environnement), aurait stoppé toute attaque en raison du caractère irrégulier de la trajectoire, de la puissance de l'impact et de la rémanence du déplacement. La déclivité reste importante sur plus de 90 mètres.

♦ L'aire couverte par l'arc nous paraît réduite par rapport à ce que nous étions en droit d'attendre. Mais nous ignorons divers paramètres pouvant sensiblement affecter les performances des flèches. À commencer par leur empennage. Large, il assure une meilleure précision. Mais il freine la course de la flèche, surtout lors d'un tir de saturation. Dans quelles proportions ? Les qualités des arcs antiques nous sont mal connues car les auteurs anciens mentionnent des performances effectuées avec un matériel différent. Beaucoup de références d'archerie viennent des combats du Moyen Age. Y avait-il des différences sensibles entre les arcs de l'Antiquité et ceux du XIV^{e} siècle ? Dans l'affirmative, quelles étaient-elles ? Essence ? Corde ? Tension ? Forme ? Bois jeune ou bois sec ? Que devient le maniement d'un arc si le bander requiert des qualités athlétiques particulières ? Quelle résistance pouvaient avoir les cordelettes de chanvre ou de lin ? Quelle était leur capacité de conservation selon l'hygrométrie ambiante ? Autant de questions sans vraies réponses.

Pour revenir aux résultats des essais, il apparaît que la portée des flèches est limitée compte tenu du dénivelé (environ 50 mètres).

Les raisons :

- Les caractéristiques de l'arc : l'emploi d'un arc peu puissant de part sa technique de fabrication, son profil déflexe qui s'est accentué avec l'âge ("il suit la corde").
- L'archer : la peur de briser son arc l'a amené à ne pas tirer à son allonge normale et donc a ne pas utilisé l'arc au maximum.
- Les flèches : leurs poids importants (50 g de moyenne) et en particulier celui de la pointe en fer qui déplace le centre de gravité vers l'avant réduisant les qualités de vol. Ce poids des pointes provoque aussi des déformations de la flèche au moment de la décoche (paradoxe de l'archer), influant sur les trajectoires. Pour limiter ces déformations, les hampes de flèches présentent souvent des sections au milieu plus importantes qu'aux extrémités. Ce ne fût pas le cas des flèches employées lors de ces essais.

D'autre part, les pointes de flèches et plus particulièrement celles à une barbelure sont positionnées sur les fûts de manière aléatoire. Si la barbelure ne se trouve pas dans l'axe du fer, le vol s'en trouvera affecté, la flèche tournant sur elle-même.

♦ Prendre en compte l'expérience, l'adresse et d'une manière générale les performances de combattants antiques relève de la spéculation hasardeuse. La seule idée qui nous parait juste est que leurs performances, en raison de leur professionnalisme, étaient supérieures à celles des expérimentateurs contemporains. Dans quelles proportions ? Mais on admettra aisément que le dénivelé important des falaises dominant Loulié, en l'occurrence une cinquantaine de mètres en moyenne par rapport aux assaillants, donne un avantage considérable aux défenseurs. Le tir de saturation ou d'interdiction effectuée contre des assaillants était praticable par tous, hommes, femmes, enfants. Il suffisait que la pierre soit lancée à une trentaine de mètres pour que sa chute en courbe lui fasse atteindre des vitesses importantes. La masse limite les portées comme le démontre le tableau ci-dessous.

L'indice de performance a été calculé en multipliant le dénivelé total — du point de départ au point d'arrivée augmenté de l'altitude imprimée par le lanceur — par la distance, le nombre obtenu étant divisé par le poids en grammes des galets. Le résultat a été arrondi par suppression des décimales au chiffre le plus proche.

EFFICACITÉ DES LANCERS A LA MAIN							
N° d'identi-fication	**Nature du galet**	**Section en cm**	**Longueur en cm**	**Poids en g.**	**Distance atteinte en m**	**Dénivelé par rapport au Z_0(*)**	**Indice de performance**
23	basalte	5 x 5,9	2,6	165	84	41	22
29	quartz	4,7 x 6,1	3,8	125	85	39	28
30	granit	4,5 x 6,8	3,6	160	77	41	21
33	granit	5,8 x 5,8	4,6	220	66	40	12
34	gneiss	5,4 x 6,2	3,7	160	82	40	21
36	schiste	6,5 x 5,5	4,3	230	76	41	14
37	granit	6,4 x 6,7	4,5	285	69,5	40	10
39	basalte	5,5 x 7,8	2,9	230	75,5	41	14
40	granit	5,4 x 6,2	3	145	79	40	23
41	granit	6,7 x 8,4	4,6	330	70	40	9
43	schiste	6,5 x 6,5	4,8	265	64,5	39	10
44	granit	5,6 x 6,8	4,1	200	75,5	41	16
45	granit	6,8 x 8,9	3,5	300	72	40	10
50	quartz	1,6 x 2,7	3,2	80	77	41	41
51	quartz	1,6 x 2,6	3,4	90	80	40,5	37
52	basalte	1,8 x 3,4	4,4	130	81	41	27
53	quartz	2,1 x 4,2	5	200	73	41	16
54	granit	1,8 x 2,7	4,6	120	75	37,5	24
55	quartz	2,6 x 4,3	5,1	240	63	36,5	11
56	granit	2,6 x 4,6	7,3	340	63	40,5	8
57	basalte	1 x 3,5	4,5	100	81	39	33
58	basalte	1,1 x 3,8	5,1	130	80	39	25
59	gneiss	2,6 x 3,6	5,1	190	59	39,5	13

(*) Dénivelé total = Zo + 1,60 m.

Pour la fronde, la vitesse d'éjection de la pierre est très élevée (33 m/s, soit environ 119 Km/h. A l'impact, sa vitesse atteint 48 m/s soit environ 173 km/h). Le mode de calcul de l'indice de performance adopté est le même que celui du lancer de galets. On notera qu'alors que constance et progression régulière sont les caractéristiques des lancers à la main, il n'en va pas de même avec le tir à la fronde. On enregistre pour des galets similaires des variations de performances pouvant aller du simple au double. La séquence statistique à notre disposition est courte car malgré la peinture rouge censée faciliter leur repérage, nous avons perdu la moitié des galets. Cela a eu, bien entendu, une incidence sur les conclusions que nous pouvons tirer.

La puissance et la portée plus importantes des balles de fronde ont été constatées lors de nos essais, et si la précision de cette arme est moindre que celle de l'arc, on comprend mieux pourquoi César lors de ses campagnes, précisait qu'il redoutait plus les balles de fronde que les flèches.

D'autre part lors de la prospection dans le champ labouré (parcelle 210) nous avons constaté la présence dans cette zone de plusieurs pierres de fronde d'époque ancienne (pierres régulières, forme ovale, de 50 à 200 g). Celles-ci ne se retrouvent plus à une distance supérieure à 170 m de la zone de tir n°1.

EFFICACITÉ DES TIRS A LA FRONDE							
N° d'identi-fication	**Nature du galet**	**Section en cm**	**Longueur en cm**	**Poids en g.**	**Distance atteinte en m**	**Dénivelé par rapport au Z_0(*)**	**Indice de performance**
13	basalte	3,7 x 5,4	2,6	85	151	63	115
15	quartz	4 x 5	3,7	85	109	49	65
16	granit	3,6 x 4,4	3,6	70	106	48,5	76
17	gneiss	4,9 x 4,9	2,9	90	105	48,5	58
19	granit	4,5 x 4,6	2,9	75	152	63,5	132
21	granit	3,9 x 4,7	3	85	145	60	105
28	granit	3,3 x 4,6	4	85	154	63,5	118

(*) Dénivelé total = Zo + 1,60 m.

♦ Les groupements de tirs dessinent autour du site un périmètre d'insécurité. À l'intérieur de cette zone, le combattant ne pouvait pratiquement pas voir arriver le projectile. Et qu'il s'agisse de galets ou de flèches, leur arrivée est silencieuse. Le danger était donc difficile à éviter.

♦ Le temps de fabrication des flèches et plus particulièrement des hampes confirme l'intérêt de la récupération de celles-ci. Nous avons constaté en effectuant les ramassages suite aux tirs que les flèches fichées dans la terre ou le bois n'avaient pas subi de déformations notables les rendant inutilisables pour d'autres tirs. Par contre lors de leurs extractions seules les hampes étaient facilement récupérables. Les pointes restaient enfoncées parfois profondément dans le sol. Cette constatation pourrait expliquer la découverte d'un grand nombre de fers de flèche lors des fouilles anciennes et qui avait fourni à certains auteurs un argument pour rejeter ce lieu comme emplacement d'une bataille.

Jusqu'à présent, nous pensions que la découverte de ce grand nombre de pointes était due au fait de leur protection par des blocs jetés du haut de la falaise lors des combats (d'après les photos commentées de A. Laurent-Bruzy et de A. Viré et les témoignages d'ouvriers ayant effectué les fouilles), les préservant et interdisant leurs récupérations par les acteurs de cette bataille.

2- Tirs depuis la tour romaine vers le camp Gaulois, essais du 17 juin 2006 (plan n° 2)

2-1 –But

À partir d'un camion élévateur muni d'une nacelle qui monte à 30 m de hauteur, simulant la tour romaine, pratiquer des lancers et des tirs sur le site de la fontaine de Loulié selon les méthodes antiques. Ces essais ont permis de déterminer les portées, les zones d'insécurité, d'appréhender les qualités de vol des projectiles et leur efficacité et surtout de valider les observations réalisées lors des recherches archéologiques récentes.

2-2 – Lieu

La plateforme de tir a été placée en aval de la fontaine de Loulié, dans le virage à côté du portail d'entrée de la maison en aval du site.

2-3 - Conditions atmosphériques.

Le ciel était dégagé, la température avoisinait 28° C, un vent léger venait du sud-ouest et le sol était sec. A 18h 15, un orage a éclaté.

2-4 - Figurants Romains, lieu de campement

Une troupe de plusieurs figurants sous la houlette de Pascal Lavaud «la XII^{e} légion *Fulmita* » a établi un campement autour de la fontaine de Loulié. Le public a été admis sur le site, une fois les essais de tirs terminés

2-5 - Fabrication des armes employées

Les armes employées sont fabriquées selon les méthodes antiques par Pascal Lavaud, taillandier de son état.

2-6 - Essais réalisés

Le camion élévateur muni d'une nacelle, suite à une manifestation, a été bloqué à Bretenoux. Malgré l'intervention de la gendarmerie, l'engin est arrivé sur le site avec 4 heures de retard.

Les essais de tirs à la frondes, au *fustibales* et le lancer franc de galets ont été annulés. Les essais de tirs à l'arc se sont déroulés correctement par contre, les essais à la catapulte ont été non concluants, car la température importante a fait rompre la corde du tendeur. Après réparation du tendeur avec une autre corde trop courte, 3 tirs non concluants en distance ont été réalisés.

2-6-1 - Tir à l'arc

L'arc utilisé, fabriqué par P. Lavaud est en if. Il est recouvert de cuir collé, avec des coches situées à environ 3 cm de l'extrémité des branches pour fixer la corde. D'une longueur de 1,20 m, ce qui lui donne un rapport longueur de l'arc / allonge de 2 pour 1. Il présente en son milieu une section ovale de 4 cm de large et de 3 cm d'épaisseur. Arc légèrement déflexe, il possède une fois bandé une hauteur d'environ 1 m. Sa puissance est évaluée à environ 55 livres.

La longueur totale des flèches utilisées varie entre 0,65 m et 0,85 m, le poids total varie entre 43 g et 62 g.

Pointe de flèche droite : poids entre 9 et 11 g, longueur entre 7 et 7,8 cm, section du fer moyenne 0,5 x 0,5 cm, section douille extérieure moyenne 1 cm, section douille intérieure moyenne 0,8 cm.

Pointe de flèche à barbelure : poids entre 10 et 19 g, longueur entre 7,5 et 8 cm, section fer moyenne 0,5 x 0,5 cm, section douille extérieure moyenne 1 cm, section douille intérieure moyenne 0,8 cm.

Hampe : en cèdre et épicéa, l'empennage en plumes de poule ou de dinde collée est maintenu par des tendons. L'encoche réalisée dans le fût est renforcée par du tendon.

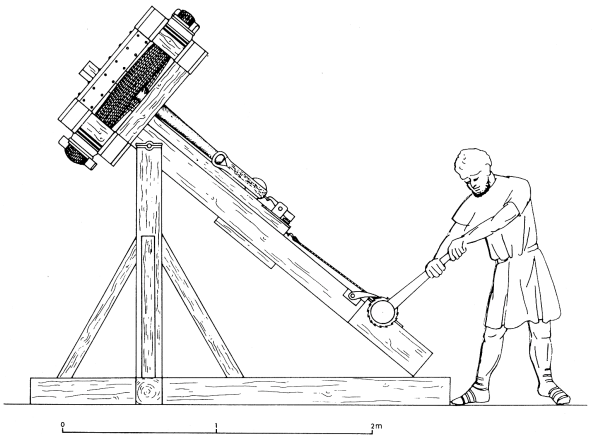
15 tirs ont été réalisés en direction de la fontaine Cessac (12 tirs à 45°, et 2 tirs à 30° et 1 tir à 20°).

TIR A L'ARC								
N° flèche	Observations	poids total en g	Temps total en sec.	Distance atteinte en m	Dénivelé par rapport au Z_0	Inclinaison en degrés	Direction en degrés azimut	Enfonce-ment en cm
1	Pointe de flèche à barbelure, tir à 30°, pouce et index	48	3,5	110	+ 4,7	34°		9,5
2	Pointe de flèche à barbelure, tir à 45°, pouce et index	52	4,5	112	+ 4,34	54°	90°	8,5
3	Pointe de flèche à barbelure, tir à 45°, pouce et index	55	4,5	110,10	+ 3 ,29	57°	92°	15
4	Pointe de flèche à barbelure, tir à 45°, 2 doigts index-majeur	59	4,5	110,60	+ 4,10			
5	Pointe de flèche à barbelure, tir à 45°, pouce et index	43	4,5	95,10	- 4,25			14,5
6	Pointe de flèche à barbelure, tir à 45°, pouce et index	57	4,5	94,90	- 4,53	56°	112°	17
7	Pointe de flèche à barbelure, tir à 45°, 2 doigts index-majeur	65	4,5	113,50	+ 5,32	51°	93°	12
8	Pointe de flèche à barbelure, tir à 45°, 2 doigts index-majeur	57	4,5	110,65	+ 4,25	41°	94°	14
9	Pointe de flèche à barbelure, tir à 45°, pouce et index	62	4,5	97,80	- 3,20	54°	117°	9.5
10	Pointe de flèche à barbelure, tir à 30°, pouce et index	55	3,5	106,70	+ 1,26	33°	117°	6,5
11	Pointe de flèche à barbelure, tir à 45°, 2 doigts index-majeur	51	4,5	110,40	+ 4,35	51°	92°	12,5
12	Pointe de flèche droite, tir à 20°, pouce et index	52	3	100	- 3,18	23°	116°	11
13	Pointe de flèche droite, tir à 45°, 2 doigts index-majeur	62	4,5	105,20	+ 0,27	47°	92°	12,9
14	Pointe de flèche droite, tir à 45°, 2 doigts index-majeur	50	4,5	113,90	+ 6,29	43°	86°	16
15	Pointe de flèche droite, tir à 45°, pouce et index	55	4,5	101,7	- 2,34			
Z : altitude du tir sur la plateforme = 164,70 m. Hauteur du tir par rapport au sol 26 m								

RÉSULTATS DES ESSAIS DE TIRS À L'ARC												
Données utilisées	*TIR N° 1*	*TIR N°2*	*TIR N°3*	*TIR N°6*	*TIR N°7*	*TIR N°8*	*TIR N°9*	*TIR N°10*	*TIR N°11*	*TIR N°12*	*TIR N°13*	*TIR N°14*
Longueur atteinte X_I en m	110	112	110,1	94 ,9	113,5	110,7	97,8	106,7	110,4	100	105,2	113,9
Dénivelé par rapport au tireur en m	4,7	4,34	3,29	-4,53	5,32	4,25	-3,2	1,26	4,35	-3,18	0,27	6,29
Masse m en kilogramme	0,048	0,052	0,055	0,057	0,065	0,057	0,062	0,055	0,051	0,052	0,062	0,050
Angle du tir en degrés	30°	45°	45°	45°	45°	45°	45°	30°	45°	20°	45°	45°
Angle du tir en radians	0,523	0,785	0,785	0,785	0,785	0,785	0,785	0,523	0,785	0,349	0,785	0,785
Résultat des calculs												
Vitesse initiale : Vo en m/s (formule 2)	36,68	33,81	33,37	29,81	34,18	33,61	30,48	35,13	33,58	37,46	32,17	34,39
Vitesse finale : V_I en m/s (formule 6)	35,40	32,52	32,39	31,26	32,62	32,34	31,49	34,77	32,28	38,29	32,08	32,65
Hauteur à l'apogée : h en m (formule 4)	17,15	29,13	28,37	22,64	29,77	28,78	23,68	15,72	28,73	8,37	26,37	30,14
Longueur X_A en m (formule 5)	59,40	58,26	56,75	45,29	59,54	57,56	47,35	54,46	57,46	45,98	52,74	60,28
Longueur X_B en m (formule 8) on a bien $X_B = 2\ X_A$	118,8	116,5	113,5	90,6	119,1	115,1	94,7	108,9	114,9	92	105,5	120,6
Temps pour atteindre l'apogée, $t = X_A / V_0 \cos \alpha$ en s	1,87	2,44	2,41	2,15	2,46	2,42	2,20	1,79	2,42	1,31	2,32	2,48
Temps pour atteindre le but, $t = X_I / V_0 \cos \alpha$ en s	3,46	4,68	4,67	4,50	4,70	4,66	4,54	3,51	4,65	2,84	4,63	4,68
Énergie totale : $Et = 1/2\ mV_0^2$ en J (elle est constante)	32,29	29,72	30,62	25,32	37,97	32,19	28,80	33,93	28,75	36,49	32,07	29,57
Énergie cinétique au moment de l'impact : $Ec = 1/2mV_I^2$ en J	30,08	27,50	28,84	27,86	34,57	29,81	30,75	33,25	26,57	38,11	31,91	26,48
Vérification : $E_p = mgH$	2,21	2,21	1,78	-2,53	3,39	2,38	-1,95	0,68	2,18	-1,62	0,16	3,09
Vérification : on retrouve bien $E_t = E_c + E_p$	32,29	29,72	30,62	25,32	37,97	32,19	28,80	33,93	28,75	36,49	32,07	29,57

2-6-2 - Tir à la catapulte

La reconstitution de la catapulte et des fers de trait a été réalisé par Pascal Lavaud, selon les données de Vitruve[2], et les essais de reconstitution réalisés par Dietwulf Baatz[3].



Dietwulf Baatz : essai de reconstitution d'une catapulte

Caractéristique des traits :
Poids total : entre 132 et 169 g.
Longueur totale entre 70 et 80 cm
Fer de trait : poids entre 55 et 75 g, longueur totale entre 8 et 10 cm, pointe du fer entre 3,5 et 4 cm, section fer entre 1,3 et 1,4 cm, diamètre douille extérieure 1,8 cm, diamètre douille intérieur 1,5 cm.
Hampe : en épicéa, longueur 0,60 m, diamètre 1,7 cm. L'empennage réalisé sur 3 côtés est en peau de mouton : longueur 19 cm, largeur de 2,5 à 0,5 cm (en partant de l'extrémité), distance par rapport à l'extrémité 7,5 cm.

TIR A LA CATAPULTE

N° trait	Observations	poids total en g	Temps total en sec.	Distance atteinte en m	Dénivelé /p rapport au Z_0	Inclinaison en degrés	Direction en degrés Azimut	Enfonce-ment en cm
1	Corde détendue suite à la chaleur	132	1,5	81	3,52	27	65	19
2	Corde détendue suite à la chaleur	149	1,5	70,4	2,13	15	70	10
3	Corde détendue suite à la chaleur	143	1,5	70,2	1,96	23	104	10
Z : altitude du tir sur la plateforme = 150 m. Hauteur du tir par rapport au sol 11,30 m								

RÉSULTATS DES ESSAIS DE TIRS À LA CATAPULTE

Données utilisées	***TIR N° 1***	***TIR N°2***	***TIR N°3***
Longueur atteinte X_I en m	81	70,4	70,2
Dénivelé par rapport au tireur en m	3,52	2,13	1,96
Masse m en kilogramme	0,132	0,149	0,143
Angle du tir en degrés	10°	10°	10°
Angle du tir en radians	0,174	0,174	0,174
Résultat des calculs			
Vitesse initiale : Vo en m/s (formule 2)	55,53	49,37	48,91
Vitesse finale : V_I en m/s (formule 6)	54,90	48,95	48,52
Hauteur à l'apogée : h en m (formule 4)	4,74	3,75	3,68
Longueur X_A en m (formule 5)	53,75	42,49	41,70
Longueur X_B en m (formule 8) on a bien $X_B = 2\ X_A$	107,49	84,98	83,41
Temps pour atteindre l'apogée, $t = X_A / V_0 \cos \alpha$ en sec.	0,98	0,87	0,87
Temps pour atteindre le but, $t = X_I / V_0 \cos \alpha$ en sec.	1,48	1,45	1,46
Énergie totale : $Et = 1/2mV_0^2$ en J (elle est constante)	203,49	181,59	171 ,05
Énergie cinétique au moment de l'impact : $Ec = 1/2mV_I^2$ en J	198,93	178,48	168,30
Vérification : $E_p = mgH$	4,56	3,11	2,75
Vérification : on retrouve bien $E_t = E_c + E_p$	203,49	181,59	171,05

[2] - Vitruve - *De architectura*, livre 10, chapitre 1-12.
- Choisy (Auguste), Vituve, *De l'architecture*, livre 10, texte et traduction, collection Budé, Belles-Lettres, Paris 1986. voir chapitres 10-12 du livre 10.
[3] - Dietwulf Baatz. - *Recent Finds of Ancient Artillery*. Britannia, IX, 1978, 17 p.

2-7 - Commentaires

Les essais de tirs à l'arc depuis la plateforme située à 26 m par rapport au sol, altitude 163,10 m et à 115 m de la source Cessac ont permis de parfaitement couvrir la zone des impacts trouvés à la fouille. En réalité, à l'emplacement du tir, le sommet de la tour reposant sur la plateforme devait être à l'altitude comprise entre 165 et 175 m, donc bien plus haut que nos essais.

La vitesse initiale donnée à la flèche varie de 30 à 37 m/s ce qui correspond de 108 km/h à 133 km/h. La vitesse finale varie de 31 à 38 m/s ce qui correspond de 118 à 137 km/h. L'énergie cinétique au moment de l'impact varie de 27 à 38 j. Enfin l'enfoncement des flèches dans le sol très sec au moment des essais varie de 7 à 17 cm, ce qui confirme que lors de leurs extractions seules les hampes devaient êtres facilement récupérables.

L'inclinaison des flèches fichées dans la terre selon les tirs réalisés correspond bien aux angles théoriques attendus. Lors des recherches archéologiques, les flèches trouvées fichées profondément dans le sol gaulois avaient des angles semblables : tirs tendus voisin de 20° et tirs de portée maximale en prenant un angle de visée d'environ 45°.

Trois pointes de flèches ont eu l'extrémité recourbée à angle droit et une flèche était déformée et fendue. Ces déformations sont semblables à celles qui ont été observées dans les fouilles récentes.

Les essais de tirs à la catapulte non concluants semblent dus à la chaleur qui a détendu les cordages[4] et fait rompre la corde de rappel du tendeur. Il aurait fallu mouiller les cordages. Lors des premiers essais aux arènes Romaines de Blagnac, début juin 2006, les distances atteintes variaient entre 120 et 130 m avec un angle de tir d'environ 20°.

On est loin des performances décrites par certains auteurs : les traits étaient lancés par des catapultes légères *(scorpio),* machines redoutables, qui tiraient des traits à tir tendu à une distance[5] allant de 300 à 600 m. La portée pratique optimale devait se situer entre 50 et 150 m. Tout repose sur les cordes de torsion qui étaient fabriquées en crins de chevaux, en nerfs de bœuf ou de cerf ou bien encore avec des cheveux de femme de plus de 60 cm de longueur. Toutes ces matières sont difficiles à se procurer.

---

[4] - Réalisés en nylon puis par un assemblage de fils de chanvre.

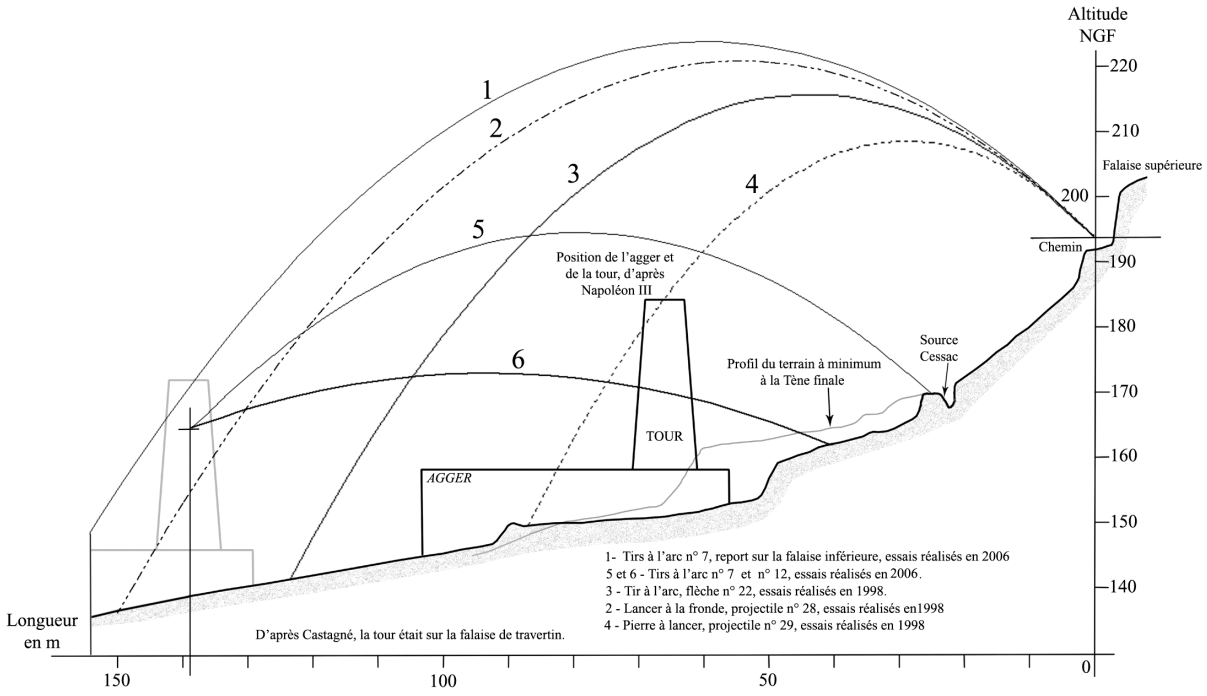
[5] - La bibliographie relative aux armes de jet est considérable. On la trouvera dans l'ouvrage de Jacques Harmaud, *l'armée et le soldat à Rome de 107 à 50 avant notre ère,* Paris, Picard, 1967, p. 92-96. Les annotations de l'auteur font ressortir la diversité des opinions sur les dénominations des engins, sur leurs structures et sur leurs portées. Jacques Harmaud conclut que "l'évaluation des portées extrêmes de l'artillerie antique oscille entre 180 et 740 mètres environ" (p. 94).

Également à propos de l'armement romain, voir :

- Feugère (M.). - *Les armes des Romains*. Édition Errance, 1993.
- Flavius (J.). - *Guerre des Juifs* (A. Pelletier). Coll. Guillaume Budé, Paris, Belles-Lettres ; Livre I, 1975 ; t. 2, Livres II-III, 1980; t. 3, Livres IV-V, 1982.

3 - Conclusion

Ces essais ont permis, en déterminant les portées maximales des différents projectiles, de montrer que si la tour était bien positionnée à l'endroit supposé par les fouilles anciennes, celle-ci était entièrement sous le feu de l'ennemi.

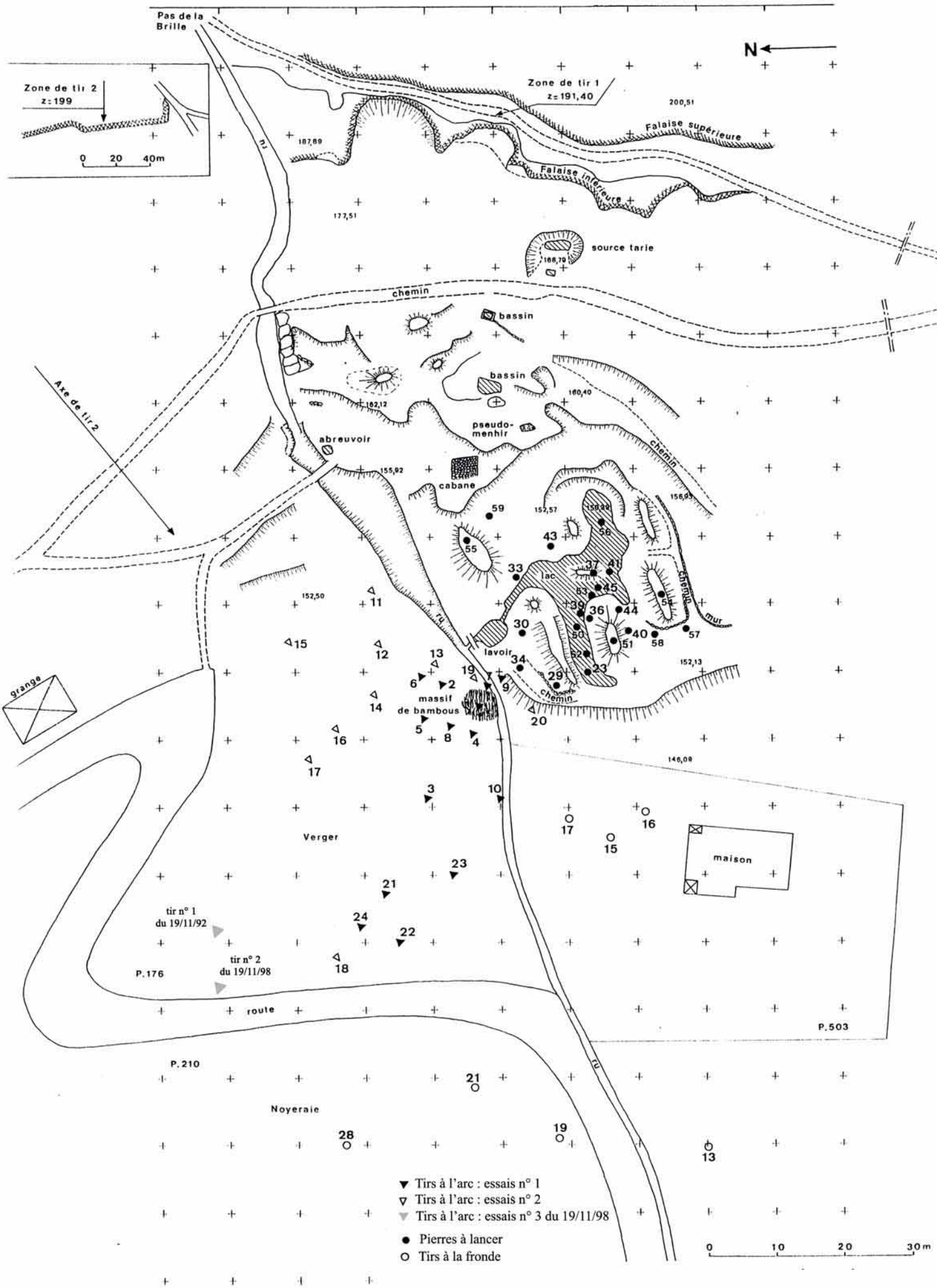


RÉSULTATS DES ESSAIS DE TIRS RÉALISÉS EN 1998 ET 2006

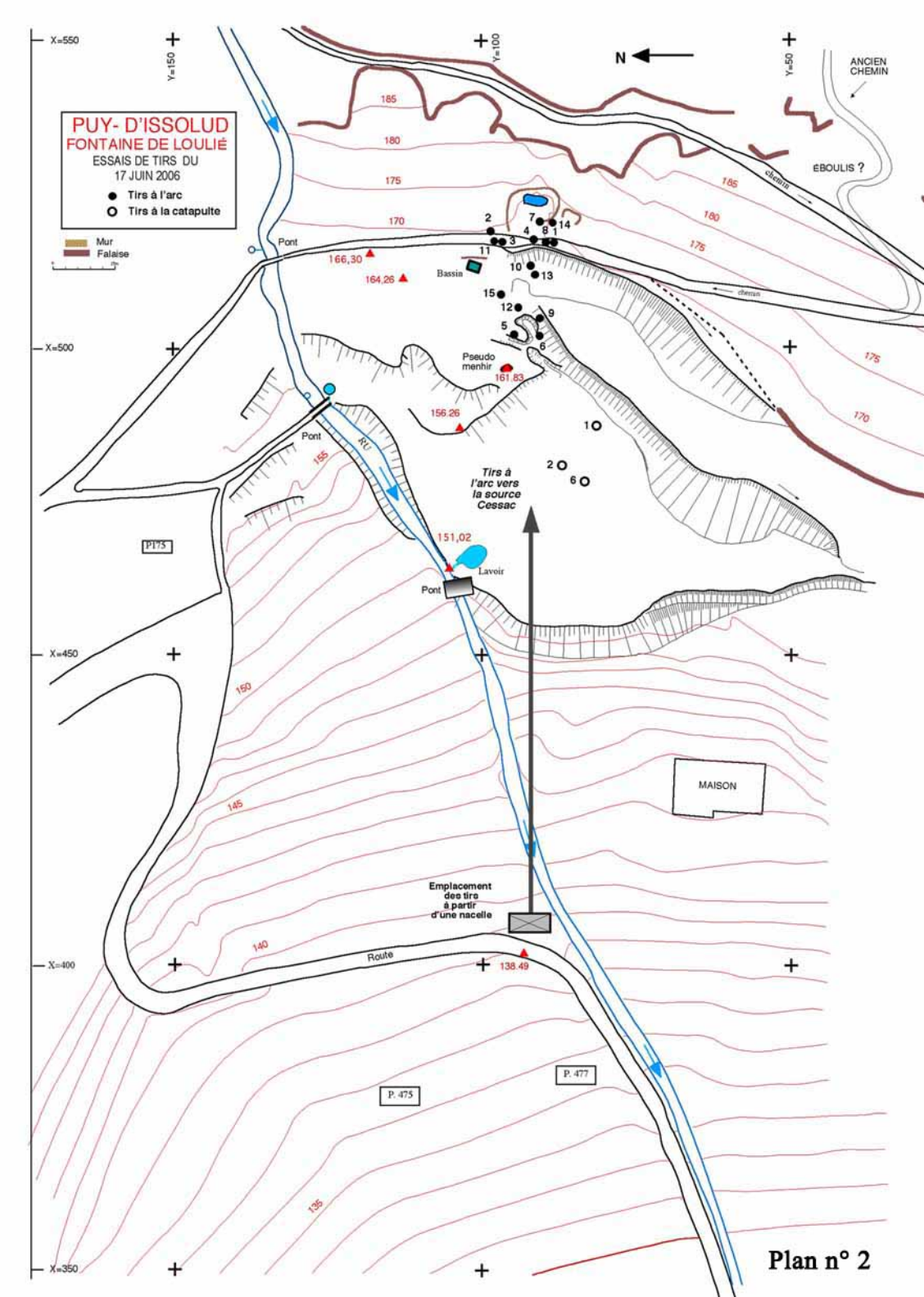
D'après les spécialistes militaires et le résultat des recherches, la source n'a pu être défendue qu'en aval par une série de fortifications, les frondeurs et des archers étant sur le haut de falaises. Il est évident que son abandon aurait permis aux Romains son empoisonnement immédiat.

Dans cette hypothèse, les très nombreux galets découverts en aval de la fontaine, sur la plateforme de travertin, ont pu êtres lancés par les Romains à l'aide de balistes et de frondes.

La tour située beaucoup plus en aval, permettait aux Romains de tenir le bassin gaulois sous leur feu et de rendre ainsi son accès dangereux, à moins qu'un mur ou palissade, continu ou discontinu, ne s'élève le long du chemin d'accès, protégeant ainsi ceux qui s'y rendaient.



Plan n° 1 - Résultat des tirs effectués en 1998


PUY- D'ISSOLUD
FONTAINE DE LOULIÉ
ESSAIS DE TIRS DU
17 JUIN 2006
Tirs à l'arc
Tirs à la catapulte
Mur
Falaise
X=550
X=500
X=450
X=400
X=350
Y=150
Y=100
Y=50
N
ANCIEN CHEMIN
ÉBOULIS ?
chemin
Pont
166,30
164,26
Bassin
Pseudo menhir
161,83
156,26
Pont
RU
Tirs à l'arc vers la source Cessac
151,02
Lavoir
Pont
P175
MAISON
Emplacement des tirs à partir d'une nacelle
Route
138,49
P. 475
P. 477
185
180
175
170
155
150
145
140
135

Plan n° 2

1

Zone de tirs n° 1, chemin supérieur, au-dessus de la fontaine de Loulié.

2

Zone de tir n° 2, au-dessus des falaises, côté nord-est de la fontaine de Loulié

3

4

5

6

Fontaine de Loulié : essais de tirs à la fronde, expérience du 25 février 1998.

Zone de tir 1 7

Zone de tir 2 8

Zone de tir 2 9

Essais de tir à l'arc
expérience du 30 janvier 1998

10

11

Zone de tir 1

Essais de tir à l'arc, expérience du 19 novembre 1998

12

13

14

Tir à l'arc depuis la tour Romaine
Expérience du 17 juin 2006

15 Reconstitution de la catapulte utilisée pour les essais
par Pascal Lavaud d'après les données de Vitruve et de Dietwulf Baatz.

16

17

18

Essais à la catapulte depuis la tour romaine.
Expérience du 17/6/2006

19

Flèches utilisées
pour le tir à l'arc

Fers de traits
utilisés pour les tirs
à la catapulte

20

Fontaine de Loulié
expérience d'essais de tirs
du 17 juin 2006

22

21

Relevé de la direction et de l'inclinaison des flèches

Lieutenant-colonel Jean-Pierre Biberson
chargé des ordres de tirs

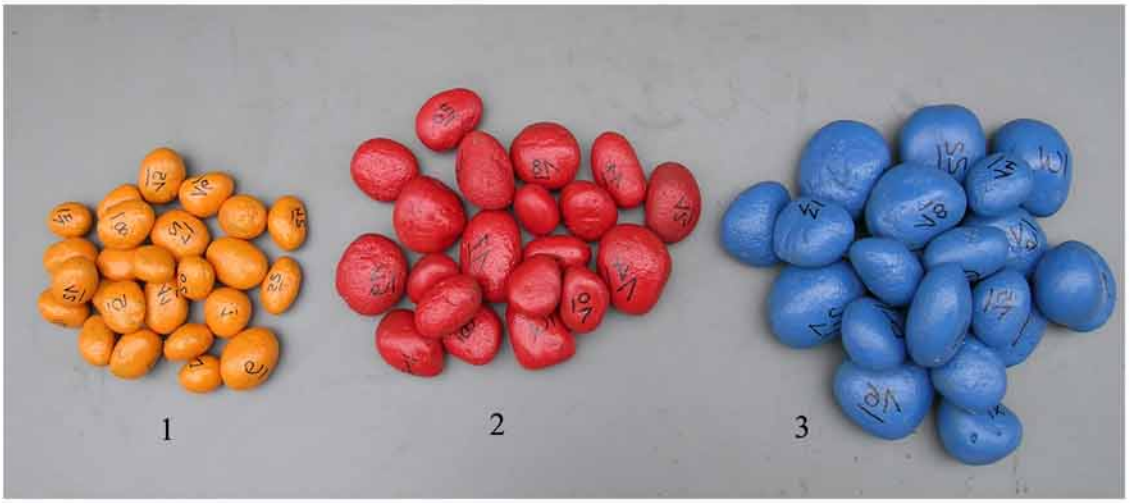
Relevés des dimensions et du poids des projectiles par les étudiants ayant participés aux fouilles. 23
Expérience de tirs du 17 juin 2006

24

50 cm

Expérience de tir du 17 juin 2006 : reconstitution d'un fer de trait de catapulte

25



1 m

Projectiles : 1 - Pierres de fronde ; 2 - pierres à lancer à la main ; 3 - pierres à lancer au *fustibales*

26
Les élus en pleine discussion : de gauche à droite - Pierre Prangère (maire de Saint-Michel-de Bannières) Hugues Dupradel (maire de Vayrac), Bertrand Lacarrière (maire de Saint-Denis-lès-Martel), Jean-Claude Requier (conseiller général et maire de Martel), Francis Lhermitte (sous préfet à Gourdon).

27

28

29 Les élus visitent le site, puis se restaurent

Visite du site de Loulié après les tirs par le public.
La catapulte est demontée.

Expérience de tirs du 17 juin 2006