



UNIL | Université de Lausanne

Unicentre

CH-1015 Lausanne

<http://serval.unil.ch>

---

Year : 2022

## Développement et évaluation d'une nouvelle méthode de discrimination automatique des projectiles basée sur la texture directionnelle. Application aux projectiles de la Kalashnikov AKM 47

Djadja Hassen

Djadja Hassen, 2022, Développement et évaluation d'une nouvelle méthode de discrimination automatique des projectiles basée sur la texture directionnelle. Application aux projectiles de la Kalashnikov AKM 47

Originally published at : Thesis, University of Lausanne

Posted at the University of Lausanne Open Archive <http://serval.unil.ch>

Document URN : urn:nbn:ch:serval-BIB\_CC61BE86DDEC2

### **Droits d'auteur**

L'Université de Lausanne attire expressément l'attention des utilisateurs sur le fait que tous les documents publiés dans l'Archive SERVAL sont protégés par le droit d'auteur, conformément à la loi fédérale sur le droit d'auteur et les droits voisins (LDA). A ce titre, il est indispensable d'obtenir le consentement préalable de l'auteur et/ou de l'éditeur avant toute utilisation d'une oeuvre ou d'une partie d'une oeuvre ne relevant pas d'une utilisation à des fins personnelles au sens de la LDA (art. 19, al. 1 lettre a). A défaut, tout contrevenant s'expose aux sanctions prévues par cette loi. Nous déclinons toute responsabilité en la matière.

### **Copyright**

The University of Lausanne expressly draws the attention of users to the fact that all documents published in the SERVAL Archive are protected by copyright in accordance with federal law on copyright and similar rights (LDA). Accordingly it is indispensable to obtain prior consent from the author and/or publisher before any use of a work or part of a work for purposes other than personal use within the meaning of LDA (art. 19, para. 1 letter a). Failure to do so will expose offenders to the sanctions laid down by this law. We accept no liability in this respect.



UNIL | Université de Lausanne

Ecole des sciences criminelles

FACULTÉ DE DROIT, DES SCIENCES CRIMINELLES ET  
D'ADMINISTRATION PUBLIQUE

ECOLE DES SCIENCES CRIMINELLES

**Développement et évaluation d'une nouvelle méthode de  
discrimination automatique des projectiles basée sur la texture  
directionnelle.**

**Application aux projectiles de la Kalashnikov AKM 47**

THÈSE DE DOCTORAT

présentée à la

Faculté de droit, des sciences criminelles et d'administration publique  
de l'Université de Lausanne

pour l'obtention du grade de

Docteur ès sciences en science forensique

par

**Hassen Djadja**

*Directeur de thèse*

Professeur Christophe Champod

*Jury*

Professeur Franco Taroni, President  
Professeur Didier Meuwly, expert externe  
Docteure Monica Bonfanti, experte externe  
Docteur Fabiano Riva, expert interne

LAUSANNE

2022

*Unil*

UNIL | Université de Lausanne  
Ecole des sciences criminelles  
bâtiment Batochime  
CH-1015 Lausanne

## IMPRIMATUR

A l'issue de la soutenance de thèse, le Jury autorise l'impression de la thèse de M. Djadja Hassen, candidat au doctorat en science forensique, intitulée

**« Développement et évaluation d'une nouvelle méthode de discrimination automatique des projectiles basée sur la texture directionnelle.**

**Application aux projectiles de la Kalashnikov AKM 47 »**



Professeur Franco Taroni  
Président du Jury

Lausanne, le 12 décembre 2022

## Remerciements

Après neuf longues années, je suis ravi d'achever ce manuscrit. Les défis étaient nombreux, et parfois il m'arrivait de douter de voir ce jour arriver où je pourrais enfin rédiger ces remerciements dans ma thèse.

Au Professeur Christophe CHAMPOD, je tiens à t'exprimer ma profonde gratitude pour ton dévouement, ton expertise et ton assistance indéfectible tout au long de ce voyage académique. Je suis honoré d'avoir bénéficié de ton encadrement hors pair. Malgré les multiples défis rencontrés, ton soutien constants sur tous les plans m'a permis de mener à bien cette thèse. Encore merci pour la richesse de nos échanges et discussions, pour nos poses café détendues, et surtout pour m'avoir transmis le goût de la rigueur scientifique.

Je tiens à formuler ma profonde gratitude envers la Professeure Saliha AOUAT pour son aide précieuse et inestimable dans le domaine de l'algorithmique et le traitement d'image. Ses conseils éclairés, sa patience illimitée et son engagement m'ont grandement influencé dans le développement de solutions pour les défis algorithmiques auxquels j'ai été confronté.

Mes remerciements vont particulièrement au Professeur Franco TARONI pour son rôle essentiel en tant que président du jury et pour la richesse de nos discussions et l'excellente documentation offerte, et également au Professeur Didier MEUWLY, à la Docteure Monica BONFANTI et le Docteur Fabiano RIVA pour leurs remarques et observations pertinentes qui ont contribué à enrichir cette thèse.

Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance envers les autorités militaires au niveau de la Gendarmerie Nationale et le Ministère de la Défense Nationale, qui ont joué un rôle capital dans la facilitation de mes études doctorales. La possibilité de poursuivre mes études doctorales a été grandement facilitée par le soutien financier et logistique généreusement fourni par le bureau d'enseignement militaire de l'état-major, l'établissement de constructions mécaniques de Khenchela et la direction des relations extérieures et de coopération.

Je souhaite exprimer ma gratitude particulière envers Monsieur Sid Ahmed BERROUMANA, l'ex-directeur général de l'Institut national de criminalistique et de criminologie, et Monsieur Tayeb AMORA l'ex directeur des écoles du commandement de la Gendarmerie Nationale, pour leur soutien constant.

Je tiens à formuler ma reconnaissance envers le personnel du département balistique de l'INCC, et tous ceux, en Suisse ou en Algérie, qui ont contribué à la réalisation de cette thèse.

Je tiens à exprimer ma sincère reconnaissance envers ma mère, source infinie de soutien et de sagesse depuis mon enfance, Ses sacrifices et son amour inconditionnel ont été la lumière constante dans ma vie. À mon père, mon frère, mes sœurs, ma femme et mes enfants. Chacun de vous a apporté une contribution unique et irremplaçable à ma croissance personnelle et à mes succès.

« *Extraordinary claims require extraordinary evidence* »

CARL SAGAN

## Résumé

L'examen balistique des projectiles, à l'instar d'autres disciplines forensiques impliquant une comparaison d'images par un-e spécialiste, comme les examens en matière d'écritures et signatures, de traces papillaires ou de traces de semelles, a été et est toujours le sujet de critiques quant à son assise scientifique, notamment aux États-Unis. Cela est principalement dû au caractère subjectif qui prédomine à toutes les étapes de l'examen forensique.

L'objectif de cette recherche est de participer à la levée des réserves et des critiques qui entravent la discipline, par l'adoption d'une approche basée sur une analyse systématique de données empiriques, contrôlées, caractérisées par des taux d'erreur mesurés et de la manière la plus indépendante possible de l'utilisateur(-trice).

Dans un premier temps, l'analyse de la littérature a permis de remettre en question la pertinence de l'exploitation de la strie marquée sur les impressions laissées sur les projectiles comme vecteur essentiel de l'information permettant de discriminer les armes, même celles partageant les mêmes caractéristiques de fabrication. La proposition est faite d'adopter une signature balistique basée sur la texture directionnelle. Comparée à la strie, la texture directionnelle offre une meilleure reproductibilité de tir en tir et est plus robuste face aux conditions optiques d'éclairage et d'acquisition.

Sur cette base, un système de comparaison automatique des impressions de champ nommé BulleText a été développé. Il consiste en une acquisition avec une caméra 2D sur un microscope comparateur, une extraction de la signature balistique exploitant les *histogram of oriented gradients* (HOG) et le développement d'un algorithme de comparaison basé sur un apprentissage supervisé par *Support Vector Machine* (SVM) ou *Regularized Discriminant Analysis* (RDA).

Un échantillon de 1140 projectiles tirés par 200 fusils de type AKM 47, de calibre 7.62 x 39 mm, représentant au total 4560 impressions de champs a été exploité pour cette recherche. Ces 1140 projectiles ont été également saisis dans deux autres systèmes automatiques commerciaux, à savoir l'IBIS TRAX3D et l'EVOFINDER, afin de comparer les performances à la solution proposée.

BulleText s'est montré comme un système nettement plus performant que les deux autres systèmes commerciaux dans une tâche investigatrice, correspondant typiquement à l'établissement d'une liste d'armes potentielles à l'origine d'un projectile de question. Les courbes CMC (*Cumulative Matching Characteristics*) placent BulleText devant les autres systèmes quel que soit le rang considéré. Au rang 1, la probabilité d'une association correcte est supérieure à 95% si un nombre suffisant de projectiles est utilisé pour l'apprentissage supervisé.

La recherche propose également une évaluation de la force des associations sur une large base de données (ici 200 armes). Ce mode évaluatif est généralement pertinent lorsqu'une balle en question est comparée à du matériel de référence provenant d'une arme à feu d'intérêt. Cette force est exprimée par un rapport de vraisemblance qui a été calibré par la méthode *PAVA*, une méthode offrant de meilleurs résultats que la régression logistique. Les performances évaluatives, calculées sur plusieurs configurations, ont été mesurées par les taux d'erreur forensiques obtenus des transactions faites à partir de sources connues.

## Abstract

The forensic examination of bullets, like other forensic disciplines involving image comparison by a specialist, such as examinations of handwriting and signatures, fingerprint or footwear impressions, has been and remains subject to criticism regarding its scientific basis, particularly in the United States. This is mainly due to the subjective nature that dominates all stages of the forensic examination.

The aim of this research is to address the reservations and criticisms hindering the discipline, by adopting an approach based on a systematic analysis of empirical data, characterized by measured error rates, and as user-independent as possible.

Initially, the literature analysis allowed to question the relevance of exploiting the marked striation on bullet impressions as the essential vector of information for discriminating firearms, even those sharing the same manufacturing characteristics. The proposal is made to adopt a ballistic signature based on directional texture. Compared to striation, directional texture offers better reproducibility from shot to shot and is more robust against optical conditions of lighting and acquisition.

On this basis, an automatic comparison system for land impressions named BulleText was developed. It consists of a 2D camera acquisition on a comparison microscope, an extraction of the ballistic signature exploiting *histogram of oriented gradients* (HOG), and the development of a comparison algorithm based on supervised learning by *Support Vector Machine* (SVM) or *Regularized Discriminant Analysis* (RDA).

A sample of 1140 bullets fired from 200 AKM 47 rifles, caliber 7.62 x 39 mm, representing a total of 4560 land impressions was used for this research. These 1140 bullets were also entered into two other commercial automatic systems, namely IBIS TRAX3D and EVOFINDER, to compare performance with the proposed solution.

BulleText proved to be a significantly more effective system than the other two commercial systems in an investigative task, typically aiming at establishing a list of potential firearms originating a questioned projectile. The CMC (*Cumulative Matching Characteristics*) curves place BulleText ahead of the other systems at any considered rank. At rank 1, the probability of a correct association is over 95% if a sufficient number of bullets is used for supervised learning.

The research also proposes an evaluation of the strength of associations on a large database (here 200 firearms). This evaluative mode is typically relevant when a question bullet is compared to reference material from a questioned firearm. This strength is expressed by a likelihood ratio that has been calibrated using the PAVA method, a method offering better results than logistic regression. The evaluative performances, calculated on several configurations, were measured by the forensic error rates obtained from transactions made from known sources.

# Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>12</b>
1.1	Contexte de la recherche . . . . .	12
1.2	Buts généraux de la recherche . . . . .	13
1.3	Plan de la thèse . . . . .	13
<b>2</b>	<b>État de l’art et problématique</b>	<b>14</b>
2.1	Origine des traces sur un projectile récupéré après un tir . . . . .	14
2.1.1	Caractéristiques <i>de classe</i> (ou issues de la fabrication) . . . . .	14
2.1.2	Caractéristiques dites <i>individuelles</i> . . . . .	15
2.1.3	Caractéristiques de <i>sous-classe</i> . . . . .	15
2.2	Les différentes approches de l’identification de projectiles . . . . .	15
2.2.1	L’approche préconisée par l’ <i>AFTE</i> . . . . .	16
2.2.2	L’approche du département de la justice des États-Unis (DOJ) . . . . .	16
2.2.3	L’approche <i>CMS</i> . . . . .	19
2.2.4	L’approche basée en partie sur un rapport de vraisemblance ( <i>LR</i> ) . . . . .	19
2.3	Critiques de la discipline par la communauté scientifique et académique . . . . .	21
2.3.1	La critique par Adina Schwartz . . . . .	22
2.3.2	Les rapports du National Research Council (NRC) . . . . .	22
2.3.3	Le rapport du President’s Council of Advisors on Science and Technology (PCAST) . . . . .	23
2.4	Les travaux de recherche effectués sur les projectiles et les traces glissées . . . . .	23
2.5	Les systèmes automatiques commerciaux existants d’identification balistique . . . . .	28
<b>3</b>	<b>Objectifs de la thèse</b>	<b>29</b>
<b>4</b>	<b>Proposition d’une nouvelle définition de la signature balistique</b>	<b>30</b>
<b>5</b>	<b>L’approche proposée pour la discrimination balistique et l’évaluation</b>	<b>38</b>
<b>6</b>	<b>Développement de l’algorithme pour l’extraction de la signature balistique</b>	<b>42</b>
6.1	Équipements et protocole d’acquisition . . . . .	42
6.2	Extraction de la signature balistique . . . . .	44
6.3	Modélisation de la signature balistique par <i>machine learning</i> ( <i>ML</i> ) . . . . .	58

<b>7</b>	<b>Acquisition, échantillonnage et méthodes d'évaluation des résultats</b>	<b>59</b>
7.1	Acquisition . . . . .	59
7.2	Échantillonnage . . . . .	59
7.3	Définitions des indicateurs de performances . . . . .	59
7.3.1	Scénario projectile - projectile . . . . .	60
7.3.2	Scénario projectile - arme . . . . .	61
<b>8</b>	<b>Les performances des systèmes en mode investigatif</b>	<b>63</b>
8.1	Description des systèmes concurrents . . . . .	63
8.1.1	Le système EVOFINDER . . . . .	63
8.1.2	Le système IBIS TRAX-3D . . . . .	74
8.1.3	Le système BULLETEXT développé dans cette recherche . . . . .	78
8.2	Résultats pour chaque système en mode investigatif . . . . .	81
8.2.1	Scénario <i>projectile-projectile</i> . . . . .	81
8.2.2	Scénario <i>projectile-arme</i> . . . . .	92
8.3	Discussion des résultats investigatifs . . . . .	128
8.3.1	Influence de la hauteur de la fenêtre d'annotation dans le système <i>EVOFINDER</i> . . . . .	128
8.3.2	Comparaison des taux de rapprochement issus d' <i>EVOFINDER</i> , <i>IBIS TRAX3D</i> et <i>BulleText</i> . . . . .	128
8.3.3	Influence du premier projectile de référence: . . . . .	129
8.3.4	Influence de la distance temporelle entre le projectile de test et le groupe d'apprentissage : . . . . .	129
<b>9</b>	<b>Les performances en mode évaluatif du système <i>BULLETEXT</i></b>	<b>140</b>
9.1	Méthode de calcul du <i>LR</i> . . . . .	140
9.1.1	Sélection des configurations d'apprentissage . . . . .	141
9.1.2	Les mesures des performances forensiques de la méthode . . . . .	141
9.1.3	Calibration des <i>LRs</i> . . . . .	142
9.2	Application de la théorie de la décision . . . . .	142
9.3	Résultats . . . . .	144
<b>10</b>	<b>Conclusions et perspectives</b>	<b>170</b>
10.1	Synthèse de la problématique . . . . .	170
10.2	Contribution de cette recherche . . . . .	171
10.2.1	Proposition d'un nouveau descripteur de la signature balistique . . . . .	171
10.2.2	Développement d'un algorithme pour l'extraction de la signature balistique . . . . .	171
10.2.3	Proposition d'une nouvelle approche de la discrimination de projectiles . . . . .	172
10.3	Perspectives . . . . .	173
10.3.1	Amélioration du système <i>BulleText</i> . . . . .	173
10.3.2	Généralisation et application de la méthode développée . . . . .	174



## Liste des figures

1	Techniques utilisées dans la littérature pour l'acquisition, l'extraction de caractéristique et la discrimination . . . . .	24
2	Des stries claires et de la texture dans une impression de champs . . . . .	31
3	Stries claires mélangées avec de la texture . . . . .	32
4	Stries claires et texture directionnelle . . . . .	33
5	Stries claires noyées dans de la texture . . . . .	34
6	Omnipresence de la texture directionnelle et non directionnelles . . . . .	35
7	Schéma de discrimination pour le cas projectile-projectile . . . . .	40
8	Protocole d'acquisition des impressions de champs utilisé . . . . .	43
9	Image originale d'une impression de champs . . . . .	45
10	Texture non directionnelle de l'image originale . . . . .	46
11	Texture directionnelle de l'image originale . . . . .	47
12	Image complémentaire de la texture directionnelle . . . . .	48
13	Filtrage d'un signal de 32 pixels . . . . .	49
14	Processus de compression de l'image de texture directionnelle . . . . .	50
15	Texture directionnelle et son image compressée . . . . .	51
16	Complement de la texture directionnelle et son image compressée . . . . .	52
17	Image compressée de la texture directionnelle . . . . .	53
18	Textures directionnelles comprimées des 4 impressions de champs de 25 projectiles tirés consécutivement par la même AKM 47 . . . . .	54
19	Algorithme de HOG . . . . .	55
20	Distribution des caractéristiques HOG dans la crosse pliante d'un AKM47 . . . . .	56
21	Processus d'extraction de la signature balistique . . . . .	57
22	En haut: Photo illustrative du système <i>EVOFINDER</i> utilisé dans le cadre de cette recherche. En bas: Porte-pièce du système <i>EVOFINDER</i> . . . . .	64
23	Fenêtre de contrôle des paramètres d'acquisition du système <i>EVOFINDER</i> . . . . .	65
24	Exemple d'une liste de corrélations effectuées par le système <i>EVOFINDER</i> . . . . .	66
25	Comparaison entre deux projectiles sous le système <i>EVOFINDER</i> . . . . .	67
26	Image d'acquisition de type 2D d'un projectile par le système <i>EVOFINDER</i> . . . . .	68
27	Image d'acquisition: de type 2D, en haut, de type 2D+d au milieu et de type 3D en bas . . . . .	69
28	Les deux hauteurs d'annotation adoptées. En haut: 0.22 mm. En bas: 0.5 mm . . . . .	71
29	Exemple de résultats de corrélation du système <i>EVOFINDER</i> . . . . .	73
30	En Haut: Photo illustrative de la station <i>BULLETTTRAX-3D</i> utilisée dans le cadre de cette recherche. En bas: architecture su système <i>IBIS TRAX3D</i> . . . . .	75

31	Exemple de résultats de corrélation IBIS pour le premier projectile de test de l'arme 37 . . .	77
32	Performance en terme de précision obtenue par SVM en fonction du nombre de composantes principes retenues par PCA, dans le scénario <i>projectile-projectile</i> . . . . .	79
33	Performances en termes de précision des techniques couplées avec différentes PCA, obtenues sur base de données de 130 armes. . . . .	80
34	Illustration de la méthode de calcul des scores du système <b>BulleText</b> pour le scénario <i>projectile-projectile</i> avec une base de données (limitées à trois projectiles à des fins illustratives)	83
35	Courbes <i>CMC</i> obtenues par les systèmes <i>EVOFINDER</i> (deux variantes), <i>IBIS TRAX3D</i> (cinq variantes) et <i>BulleText</i> dans le cas <i>6VS3</i> . Taille de la base de données : 200 AKM47 . . . . .	85
36	Configuration: <i>6VS3</i> . En haut: fausse exclusion dans le champ $n^{\circ}2$ des projectiles 6 (à droite) et 3 (à gauche) de l'arme 106. En bas: faux rapprochement entre le champ $n^{\circ}2$ du projectile de test de l'arme 106 (à droite) et le champ $n^{\circ}3$ du projectile de référence de l'arme 129 (à gauche). . . . .	86
37	Configuration: <i>6VS3</i> . En haut: fausse exclusion dans le champ $n^{\circ}4$ des projectiles 6 (à droite) et 3 (à gauche) de l'arme 126. En bas: faux rapprochement entre le champ $n^{\circ}4$ du projectile de test de l'arme 126 (à droite) et le champ $n^{\circ}4$ du projectile de référence de l'arme 124 (à gauche). . . . .	87
38	Configuration: <i>6VS3</i> . En haut: fausse exclusion dans le champ $n^{\circ}1$ des projectiles 6 (à droite) et 3 (à gauche) de l'arme 130. En bas: faux rapprochement entre le champ $n^{\circ}1$ du projectile de test de l'arme 130 (à droite) et le champ $n^{\circ}4$ du projectile de référence de l'arme 181 (à gauche). . . . .	88
39	Configuration: <i>6VS3</i> . En haut: fausse exclusion dans le champ $n^{\circ}2$ des projectiles 6 (à droite) et 3 (à gauche) de l'arme 156. En bas: faux rapprochement entre le champ $n^{\circ}2$ du projectile de test de l'arme 156 (à droite) et le champ $n^{\circ}4$ du projectile de référence de l'arme 130 (à gauche). . . . .	89
40	Configuration: <i>allVS3</i> . Évolution de la précision du système <b>BulleText</b> en fonction de la taille de la base de données. . . . .	90
41	Calcul des rapports de vraisemblances du système <b>BulleText</b> pour le scénario <i>projectile-arme</i>	93
42	Configuration: <i>5VS23</i> . Fausse exclusion dans le champ $n^{\circ}2$ des projectiles 5 (en bas) et 2 et 3 (en haut) de l'arme 104. Faux rapprochement entre le champ $n^{\circ}2$ du projectile de test de l'arme 104 (en bas) et le champ $n^{\circ}4$ des projectiles de référence 2 et 3 de l'arme 157 (au milieu). . . . .	97
43	Configuration: <i>5VS23</i> . Fausse exclusion dans le champ $n^{\circ}2$ des projectiles 5 (en bas) et 2 et 3 (en haut) de l'arme 196. Faux rapprochement entre le champ $n^{\circ}2$ du projectile de test de l'arme 196 (en bas) et le champ $n^{\circ}1$ des projectiles de référence 2 et 3 de l'arme 144 (au milieu). . . . .	98
44	Configuration: <i>5VS23</i> . Fausse exclusion dans le champ $n^{\circ}4$ des projectiles 5 (en bas) et 2 et 3 ( <i>en haut</i> ) de l'arme 97. Faux rapprochement entre le champ $n^{\circ}4$ du projectile de test de l'arme 97 (en bas) et le champ $n^{\circ}4$ des projectiles de référence 2 et 3 de l'arme 155 (au milieu). . . . .	99
45	Courbes <i>CMC</i> obtenues par les systèmes <i>EVOFINDER</i> (deux variantes), <i>IBIS TRAX3D</i> (cinq variantes) et <i>BulleText</i> dans le cas <i>5VS23</i> . Taille de la base de données : 200 AKM47 . . . . .	100
46	Configuration: <i>allVS23</i> . Évolution de la précision du système <b>BulleText</b> en fonction de la taille de la base de données. . . . .	101
47	Configuration: <i>6VS234</i> . Fausse exclusion ( <i>6ème</i> position dans la liste de corrélation) pour le champ $n^{\circ}2$ des projectiles 6 (en bas) et 2, 3 et 4 de l'arme 86. . . . .	105

48	Configuration <i>6VS234</i> : faux rapprochement entre le champ $n^2$ du projectile de test de l'arme 86 (en bas) et le champ $n^3$ des projectiles de référence 2, 3 et 4 de l'arme 145. . . . .	106
49	Configuration: <i>6VS234</i> . Fausse exclusion (2 <sup>ème</sup> position dans la liste de corrélation) pour le champ $n^2$ des projectiles 6 (en bas) et 2, 3 et 4 de l'arme 119. . . . .	107
50	Configuration: faux rapprochement entre le champ $n^2$ du projectile de test de l'arme 119 (en bas) et le champ $n^2$ des projectiles de référence 2, 3 et 4 de l'arme 196. . . . .	108
51	Configuration: <i>6VS234</i> . Fausse exclusion (4 <sup>ème</sup> position dans la liste de corrélation) pour le champ $n^4$ des projectiles 6 (en bas) et 2, 3 et 4 de l'arme 156. . . . .	109
52	Configuration: faux rapprochement entre le champ $n^4$ du projectile de test de l'arme 156 (en bas) et le champ $n^1$ des projectiles de référence 2, 3 et 4 de l'arme 188. . . . .	110
53	les Courbes <i>CMC</i> obtenues par les systèmes <i>EVOFINDER</i> (deux variantes), <i>IBIS TRAX3D</i> (cinq variantes) et <i>BulleText</i> dans le cas <i>6VS234</i> . Taille de la base de données : 200 AKM47	111
54	Configuration: <i>allVS234</i> . Évolution de la précision du système <b><i>BulleText</i></b> en fonction de la taille de la base de données. . . . .	112
55	Configuration: <i>6VS1234</i> . Fausse exclusion (3 <sup>ème</sup> position dans la liste de corrélation) pour le champ $n^1$ des projectiles 6 (en bas) et 1, 2, 3 et 4 de l'arme 174. . . . .	116
56	Configuration: <i>6VS1234</i> . faux rapprochement entre le champ $n^1$ du projectile de test de l'arme 174 (en bas) et le champ $n^1$ des projectiles de référence 1, 2, 3 et 4 de l'arme 200. . . . .	117
57	les Courbes <i>CMC</i> obtenues par les systèmes <i>EVOFINDER</i> (deux variantes), <i>IBIS TRAX3D</i> (cinq variantes) et <i>BulleText</i> dans le cas <i>6VS1234</i> . Taille de la base de données : 200 AKM47	118
58	Configuration: <i>allVS234</i> . Évolution de la précision du système <b><i>BulleText</i></b> en fonction de la taille de la base de données. . . . .	119
59	Configuration: <i>6VS12345</i> . Fausse exclusion (2 <sup>ème</sup> position dans la liste de corrélation) pour le champ $n^1$ des projectiles 6 (en bas à droite) et 1, 2, 3, 4 et 5 de l'arme 79. . . . .	123
60	Configuration: <i>6VS12345</i> . faux rapprochement entre le champ $n^1$ du projectile de test de l'arme 79 (en bas à droite) et le champ $n^1$ des projectiles de référence 1, 2, 3, 4 et 5 de l'arme 106. . . . .	124
61	les Courbes <i>CMC</i> obtenues par les systèmes <i>EVOFINDER</i> (deux variantes), et <i>BulleText</i> dans le cas <i>6VS12345</i> . Taille de la base de données : 200 AKM47 . . . . .	125
62	Configuration: <i>1VS23456</i> et <i>6VS12345</i> . Évolution de la précision dans <i>BulleText</i> en fonction de la taille de la base de données. . . . .	126
63	Augmentation du taux de rapprochement au premier rang et dans les 10 premiers, suite au changement de la hauteur de la fenêtre d'annotation du système <i>EVOFINDER</i> . . . . .	130
64	Précisions [en %] obtenues au rang 1 par les systèmes <i>EVOFINDER</i> , <i>IBIS TRAX3D</i> et <i>BulleText</i> , avec les configurations à 1, 2, 3 et 4 projectiles de référence . . . . .	131
65	Précisions [en %] obtenues jusqu'au rang 10 par les systèmes <i>EVOFINDER</i> , <i>IBIS TRAX3D</i> et <i>BulleText</i> , avec les configurations à 1, 2, 3 et 4 projectiles de référence . . . . .	132
66	Moyennes des précisions obtenues au rang 1 par les systèmes <i>EVOFINDER</i> , <i>IBIS TRAX3D</i> et <i>BulleText</i> . . . . .	133
67	Moyennes des précisions obtenues jusqu'au rang 10 par les systèmes par le système <i>EVOFINDER</i> , <i>IBIS TRAX3D</i> et <i>BulleText</i> . . . . .	134
68	Effet de la distance temporelle (en nombre de tirs) sur le taux de discrimination entre le projectile de test $n^5$ et les différents groupes d'apprentissage . . . . .	135

69	Effet de la distance temporelle sur le taux de discrimination entre le projectile de test n°6 et les différents groupes d'apprentissage . . . . .	136
70	Exemple de l'effet de l'ordre chronologique entre le projectile de test et le groupe d'apprentissage de deux projectiles. En haut: projectiles d'apprentissage (2ème et 3ème). En bas: projectiles d'apprentissage (3ème et 4ème). . . . .	137
71	Exemple de l'effet de l'ordre chronologique entre le projectile de test et le groupe d'apprentissage de trois projectiles. En haut: projectiles d'apprentissage (2ème, 3ème et 4ème). En bas: projectiles d'apprentissage (3ème, 4ème et 5ème). . . . .	138
72	Exemple de l'effet de l'ordre chronologique entre le projectile de test et le groupe d'apprentissage de quatre projectiles . . . . .	139
73	Courbes illustratives des densités de $\log_{10}(LR)$ et des taux d'erreur $RMEP$ , $RMED$ , $FP$ et $FN$ . 143	
74	En haut: Courbe de calibration $ECE$ obtenue par régression logistique. En bas: Courbe de calibration $ECE$ obtenue par la méthode $PAVA$ . . . . .	147
75	En haut: Courbe de calibration $ECE$ obtenue par régression logistique. En bas: Courbe de calibration $ECE$ obtenue par la méthode $PAVA$ . . . . .	148
76	En haut: Courbe de calibration $ECE$ obtenue par régression logistique. En bas: Courbe de calibration $ECE$ obtenue par la méthode $PAVA$ . . . . .	149
77	En haut: Courbe de calibration $ECE$ obtenue par régression logistique. En bas: Courbe de calibration $ECE$ obtenue par la méthode $PAVA$ . . . . .	150
78	Distribution des densités du $LR$ , avant et après la calibration, pour le cas $1VS234$ . . . . .	151
79	Distribution des densités du $LR$ , sous $H_p$ et son maximum sous $H_d$ , pour le cas $1VS234$ . . . . .	152
80	Distribution des densités du $LR$ , avant et après la calibration, pour le cas $5VS234$ . . . . .	153
81	Distribution des densités du $LR$ , sous $H_p$ et son maximum sous $H_d$ , pour le cas $5VS234$ . . . . .	154
82	Distribution des densités du $LR$ , avant et après la calibration, pour le cas $1VS2345$ . . . . .	155
83	Distribution des densités du $LR$ , sous $H_p$ et son maximum sous $H_d$ , pour le cas $1VS2345$ . . . . .	156
84	Distribution des densités du $LR$ , avant et après la calibration, pour le cas $5VS1234$ . . . . .	157
85	Distribution des densités du $LR$ , sous $H_p$ et son maximum sous $H_d$ , pour le cas $5VS1234$ . . . . .	158
86	Courbes $Tippett$ pour le cas $1VS234$ . . . . .	159
87	Courbes $Tippett$ pour le cas $5VS234$ . . . . .	160
88	Courbes $Tippett$ pour le cas $1VS2345$ . . . . .	161
89	Courbes $Tippett$ pour le cas $5VS1234$ . . . . .	162
90	Courbes $DET$ pour le cas $1VS234$ . . . . .	163
91	Courbes $DET$ pour le cas $5VS234$ . . . . .	163
92	Courbes $DET$ pour le cas $1VS2345$ . . . . .	164
93	Courbes $DET$ pour le cas $5VS1234$ . . . . .	164
94	Taux de faux positifs et faux négatifs avant et après la calibration par la méthode $PAVA$ . . . . .	166
95	Taux de LR reportés avant et après la calibration par la méthode la méthode $PAVA$ . . . . .	167
96	Valeurs moyennes du $\log_{10}(LR)$ avant et après la calibration par la méthode $PAVA$ . En haut: sous $H_p$ . En bas: sous $H_d$ . . . . .	168
97	Taux de cas permettant l'individualisation selon les critères spécifiés avant et après la calibration par la méthode $PAVA$ . . . . .	169

## Liste des tables

1	Travaux de recherches effectués dans l'automatisation de l'identification de projectiles . . . . .	25
2	Comparaison de la définition des caractéristiques discriminantes selon la théorie de l'identification de l'AFTE et selon l'approche proposée dans ce travail . . . . .	37
3	Nombre de projectiles tirés par chaque arme . . . . .	59
4	Combinaisons d'évaluation du système pour le cas projectile-projectile . . . . .	60
5	Combinaisons d'évaluation du système pour le scénario projectile-arme . . . . .	62
6	Résultats de discrimination obtenus par le système <i>EVOFINDER</i> , <i>IBIS TRAX3D</i> et <i>BulleText</i> pour le scénario projectile-projectile*. . . . .	84
7	Résultats de discrimination obtenus par: <i>EVOFINDER</i> et <i>BulleText</i> pour le scénario <i>projectile-projectile</i> . . . . .	84
8	Faux rapprochements générés par <i>BulleText</i> pour le cas <i>6VS3 projectile-projectile</i> . . . . .	85
9	Résultats de la précision des rapprochements au premier rang et parmi le TOP-10 réalisés par la solution <i>BulleText</i> avec un apprentissage exploitant un projectile. Taille de la base de données : 800 champs de 200 AKM47 . . . . .	90
10	Résultats de la précision des rapprochements au premier rang des systèmes <i>EVOFINDER</i> , <i>IBIS TRAX3D</i> et <i>BulleText</i> avec un apprentissage exploitant deux projectiles. Taille de la base de données : 200 AKM47 . . . . .	95
11	Résultats de la précision des rapprochements au premier rang des systèmes <i>EVOFINDER</i> et <i>BulleText</i> avec un apprentissage exploitant deux projectiles. Taille de la base de données : 200 AKM47 . . . . .	95
12	Faux rapprochements obtenus par le système <i>BulleText</i> pour le cas <i>5VS23</i> . Taille de la base de données : 200 AKM47 . . . . .	96
13	Résultats de la précision des rapprochements au premier rang et parmi le TOP-10 réalisés par la solution <i>BulleText</i> avec un apprentissage exploitant 2 projectiles. Taille de la base de données : 800 champs de 200 AKM47 . . . . .	102
14	Résultats de la précision des rapprochements au premier rang pour les systèmes <i>EVOFINDER</i> , <i>IBIS TRAX3D</i> et <i>BulleText</i> en exploitant trois projectiles pour l'apprentissage . . . . .	104
15	Résultats de la précision des rapprochements au premier rang pour les systèmes <i>EVOFINDER</i> et <i>BulleText</i> en exploitant trois projectiles pour l'apprentissage . . . . .	104
16	Faux rapprochements obtenus avec le système <i>BulleText</i> pour le cas <i>6VS234</i> . . . . .	104
17	Résultats de la précision des rapprochements au premier rang et parmi le TOP-10 réalisés par la solution <i>BulleText</i> avec un apprentissage exploitant 3 projectiles. Taille de la base de données : 800 champs de 200 AKM47 . . . . .	113
18	Résultats de discrimination obtenus par: <i>EVOFINDER</i> , <i>IBIS TRAX3D</i> et <i>BulleText</i> avec un apprentissage exploitant quatre projectiles . . . . .	114
19	Résultats de discrimination obtenus par: <i>EVOFINDER</i> et <i>BulleText</i> avec avec un apprentissage exploitant quatre projectiles . . . . .	114
20	Faux rapprochements obtenus avec le système <i>BulleText</i> pour le cas <i>6VS1234</i> . . . . .	115

21	Résultats de la précision des rapprochements au premier rang et parmi le TOP-10 réalisés par la solution <i>BulleText</i> avec un apprentissage exploitant 4 projectiles. Taille de la base de données : 800 champs de 200 AKM47 . . . . .	120
22	Résultats de discrimination obtenus par: <i>EVOFINDER</i> et <i>BulleText</i> pour le scénario <i>projectile-arme</i> avec un apprentissage exploitant cinq projectiles . . . . .	121
23	Faux rapprochements obtenus avec le système <i>BulleText</i> pour le cas 6VS12345 . . . . .	122
24	Résultats de la précision des rapprochements au premier rang et parmi le TOP-10 réalisés par la solution <i>BulleText</i> avec un apprentissage exploitant 5 projectiles. Taille de la base de données : 800 champs de 200 AKM47 . . . . .	127
25	<i>RMEP</i> , <i>RMED</i> et <i>RME</i> obtenus en pourcentage avant ( <code>_noCalib</code> ) et après la calibration respectivement par la méthode de régression logistique ( <code>_LogReg</code> ) et par la méthode <i>PAVA</i> ( <code>_PAVA</code> ) . . . . .	144
26	Taux des faux positifs ( <i>FP</i> ) et de faux négatifs ( <i>FN</i> ) en pourcentage, obtenus avant ( <code>_noCalib</code> ) et après la calibration logistique ( <code>_Logis</code> ) et par la méthode <i>PAVA</i> ( <code>_PAVA</code> ) . . . . .	145
27	Somme des taux de faux positifs ( <i>FP</i> ) et du taux de faux négatifs ( <i>FN</i> ) en pourcentage, obtenus par la méthode <i>PAVA</i> ainsi que les valeurs de $\log_{10}(\text{LR})$ minimales et maximales couvrant ces cas . . . . .	145

## Glossaire

**AKM** : Fusil d'assaut Kalashnikov modernisé, version plus légère du Kalashnikov AK-47.

**Balistique**: la science des projectiles en mouvement. Un terme souvent confondu avec l'identification des armes à feu et des éléments de munition.

**Balistique extérieure**: l'étude du mouvement du projectile tiré entre la sortie du canon et la cible.

**Balistique intérieure**: l'étude du mouvement du projectile à l'intérieur de l'arme à feu.

**Balistique intermédiaire**: l'étude du mouvement du projectile près de la bouche du canon.

**balistique terminale**: l'étude de l'effet de l'impact du projectile sur la cible.

**BKA**: (Bundeskriminalamt) Office fédéral de la police criminelle d'Allemagne.

**Canon**: Partie d'une arme à feu, pouvant être rayée ou lisse, au travers de laquelle un projectile ou une charge de tir se déplace sous l'impulsion de gaz de combustion d'une charge propulsive, d'air comprimé ou d'autres moyens similaires.

**Consecutive Matching Striae (CMS)**: Variations de contour au sein de deux traces striées qui, lorsqu'elles sont comparées au microscope, s'alignent les unes avec les autres.

**EVOFINDER**: Nom commercial du système automatique de rapprochement balistique, fabriqué par la société germano-russe ScannBI.

**IBIS**: Nom commercial du système automatique de rapprochement balistique, fabriqué par la société anglo-canadienne Ultra Electronics Forensic Technology.

**Identification d'armes à feu**: Discipline de la criminalistique qui a pour mission de déterminer si un projectile, une douille ou un autre élément de munition a été tiré par une arme à feu donnée.

**Impressions de champ et de rayure**: Traces laissées sur le projectile lors de son contact avec les champs et les rayures d'un canon.

**INCC**: Institut National de Criminalistique et de Criminologie de la Gendarmerie Nationale Algérienne.

**Macroscopie comparateur**: Instrument composé de deux microscopes reliés par un pont optique qui permet d'observer deux objets simultanément avec le même degré de grossissement.

**Munition**: une ou plusieurs cartouches chargées constituées d'une douille amorcée, de la charge propulsive avec ou sans un ou des projectiles.

**Variation de contour**: Variations dans la hauteur des crêtes et des vallées dans traces glissées ou moulées.

# 1 Introduction

## 1.1 Contexte de la recherche

Chaque tir, par une arme à feu à canon rayé, laisse des traces sur la douille et le projectile de la munition utilisée. Dans un dossier impliquant l'utilisation d'armes à feu, le tribunal pose généralement les questions suivantes: 1- combien d'armes ont été utilisées dans le tir des éléments de munition (douilles et projectiles) récupérés sur la scène ? 2- ces armes ont-elles été utilisées dans le tir des éléments de munition collectés dans d'autres incidents ? 3- Est-ce qu'une arme saisie ou à disposition dans une collection a participé aux tirs des éléments récupérés ?

Afin de répondre à ces questions techniques, nous pouvons distinguer deux cas de figure où chacune des questions ci-dessus recevra un traitement différencié.

Le premier est de nature *investigative* où la demande d'examen émane des autorités d'enquête afin de proposer des pistes à l'investigation sur la base d'éventuels rapprochements entre les éléments de munition collectés et ceux organisés dans une base de données de cas ouverts ou d'armes saisies.

Le second est de nature *évaluative* où l'autorité requiert un laboratoire et par extension un expert ou une experte dans le but d'effectuer des examens techniques sur les éléments récupérés en comparaison avec des armes saisies, associées à une ou plusieurs personnes mises en cause. Les résultats de tels examens peuvent potentiellement être exploités comme moyen de preuve devant les tribunaux.

Pour les deux premières questions, le ou la spécialiste en identification d'armes à feu effectue typiquement des comparaisons « *trace - trace* » pour d'aider à déterminer si ces deux éléments de munition ont été tirés par une seule ou plusieurs armes inconnues. Ici les conclusions découlent des résultats des comparaisons entre les traces retrouvées sur les deux pièces indiciaires.

Quant à la dernière question, le ou la spécialiste effectuera des comparaisons « *trace - source putative* », afin d'aider à déterminer si la source putative retenue (une arme suspecte par exemple) a ou non tiré le ou les éléments de munitions. Dans ce cas, les conclusions découlent des résultats de la comparaison entre les traces retrouvées sur l'élément de munition de source inconnue et des éléments de munition issus des tirs de référence effectués par une ou plusieurs armes d'intérêt.

Selon l'association des spécialistes en traces d'outils et en armes à feu « *Association of Firearms and Toolmarks Examiners - AFTE* » (AFTE Criteria for Identification Committee 1992), les traces laissées par une arme sur un élément de munition sont classées dans trois catégories, à savoir, les caractéristiques *de classe*, les caractéristiques *de sous-classe* et les caractéristiques dites *individuelles*. Toujours selon l'*AFTE*, c'est le degré de correspondance observé au niveau des caractéristiques dites individuelles qui est décisif pour conclure à une identification. Mise à part l'approche dite des stries consécutives concordantes (*Consecutive Matching Striae - CMS*) (Biasotti and Murdock 1984) qui fixe a priori un seuil de correspondance nécessaire pour conclure une identification, aucun seuil fixant le degré de correspondance nécessaire à une décision n'a été proposé. Cette absence de critères rend les résultats de l'expertise subjectifs, car le ou la spécialiste se base uniquement sur sa formation, ses connaissances acquises et son expérience personnelle pour conclure. En réalité, comme nous le verrons plus loin, l'approche *CMS* ne clarifie pas les choses, le décompte du nombre de stries déclarées en concordance varie d'un spécialiste à l'autre.

Étant donné d'une part la faible reproductibilité des traces laissées sur les éléments de munition d'un tir à l'autre par la même arme et d'autre part la subjectivité qui entache les conclusions résultantes de l'appréciation d'un-e spécialiste, le domaine de l'identification d'armes à feu fait face ces dernières années à plusieurs critiques exprimées par différents acteurs qu'ils soient issus de la communauté académique (Schwartz 2005a), (Committee to Assess the Feasibility Accuracy and National Ballistics Database 2008) ou d'organes gouvernementaux (Committee to Assess the Feasibility Accuracy and National Ballistics Database 2008) (National Research Council 2009) (Advisors on Science & Technology 2016). Ces débats sont nourris surtout aux États-Unis d'Amérique où le système judiciaire accusatoire et les procédures d'admissibilité invitent à une confrontation critique plus forte que dans d'autres systèmes judiciaires, comme par exemple le système inquisitoire en force en Algérie. Les questions d'admissibilité du domaine de l'identification d'armes à feu ont

déjà animé les tribunaux américains dans plusieurs affaires où la subjectivité de la discipline a été relevée et l'expert a été enjoint de témoigner de manière adaptée et dans des limites bien définies notamment lorsque des certitudes sont avancées ("US v. Chaz Glynn" 2008) ("US v. Marlon Williams" 2019) (Tibbs 2019).

## 1.2 Buts généraux de la recherche

L'objectif de cette recherche est de contribuer efficacement à la consolidation de la discipline de l'identification des armes à feu en général et de l'identification des projectiles en particulier. Dans cette optique, cette recherche vise à atteindre les buts suivants :

1. Proposer une nouvelle définition de la signature balistique laissée sur un projectile, à travers une réflexion guidée par les constatations du praticien;
2. Sur la base de la définition proposée sous (1), il sera proposé de mettre en place et de distinguer une approche investigative (visant à faire des rapprochements à des fins d'enquête) et une approche évaluative visant à apprécier la force probante des observations dans la perspective d'une exploitation par les tribunaux.

Ces deux approches passent par la mise en oeuvre des deux objectifs supplémentaires suivants: 3. Mettre en place un système de discrimination automatique capable : - d'extraire la signature balistique conformément à la nouvelle définition proposée; - de modéliser les rayures et les canons par le biais des techniques de modélisation par apprentissage automatique; - d'évaluer numériquement la comparaison entre un projectile et les modèles d'armes potentielles d'une base de données, ou entre un fragment de projectile et les modèles de champs entrés dans d'une base de données; - d'évaluer numériquement la comparaison entre deux projectiles; 4. Évaluer les résultats de la comparaison automatique entre un projectile (ou un fragment de projectile) et le modèle d'une arme de question, en exploitant un rapport de vraisemblance.

## 1.3 Plan de la thèse

Le reste de la thèse est subdivisé en huit chapitres. Le chapitre 2 est consacré au cadre criminalistique en matière d'identification d'armes à feu en général et à l'identification de projectiles en particulier. Il détaille également l'état de l'art, les critiques qu'a essuyées ce domaine et les travaux de recherche réalisés dans l'automatisation de l'identification de projectile et les systèmes automatiques actuels d'identification balistique. Le chapitre 3 détaille les objectifs généraux de la thèse et dans quelle mesure la recherche contribue à compenser les limitations identifiées au chapitre précédent et à développer la discipline. Le chapitre 4 est consacré à la présentation de la nouvelle définition de la signature balistique exploitant la mesure de la texture. Il est suivi au chapitre 5 de la présentation des critères de rapprochement dans un contexte investigatif qui seront appelés critères de *discrimination* et sur la manière de conclure une comparaison dans un cadre évaluatif. Le sixième chapitre est réservé au développement des algorithmes utilisés pour l'extraction de la signature balistique en phase avec la nouvelle définition, la modélisation des impressions de champ des projectiles issus d'une arme à feu, ainsi que la discrimination automatique entre un projectile et une arme ou entre deux projectiles. Le septième chapitre détaille le mode d'acquisition de projectiles, le choix des armes et l'échantillonnage, les tests de performance du système proposé et la méthode du calcul des rapports de vraisemblance. C'est dans les chapitres sept et huit que nous présenterons les performances du système développé respectivement dans un mode investigatif (en en comparaison avec le système *IBIS TRAX3D* et le système *EVOFINDER*) et puis seul dans un mode évaluatif. Finalement dans le dernier chapitre nous tirerons quelques conclusions et perspectives.

## 2 État de l’art et problématique

Ce chapitre va aborder des points liés au domaine de l’examen des armes à feu et des traces d’outil en général et l’examen des projectiles en particulier, notamment l’origine et la classification des traces révélées sur les éléments de munition, les approches d’identification utilisées dans l’examen des éléments de munition, les critiques qui ont essuyé ce domaine, et les principaux travaux de recherche effectués en matière d’automatisation de l’examen des projectiles et traces glissées.

Le domaine de la balistique forensique n’est pas le seul domaine consacré à l’identification de sources qui est sous le feu de la critique. Ce sont ces critiques qui ont alimenté plusieurs travaux de recherche doctorale à l’École de Sciences Criminelles (*ESC*) dans les domaines de la comparaison des voix (Meuwly 2001), des traces papillaires (Egli 2009) (Langenburg 2012) (Hicklin 2017) (Eldridge 2020), la comparaison des traces de semelles (Pasquier 2018), la comparaison en matière d’écritures et de signatures (Marquis 2007), la comparaison des douilles (Riva 2011) ou plus récemment celle des visages (Jacquet 2021). Cette recherche s’inscrit dans la continuité de ces efforts, mais dans le domaine particulier de l’identification des projectiles. Nous renvoyons les personnes intéressées par les autres domaines aux travaux cités plus haut.

### 2.1 Origine des traces sur un projectile récupéré après un tir

Chaque projectile récupéré dans le cadre d’une enquête peut porter sur lui des traces, liées à son contact avec des objets plus durs que sa surface, telles que les traces laissées lors :

- du sertissage de la cartouche ;
- du remplissage et vidage du chargeur ou magasin ;
- du tir avec un revolver ayant un mauvais alignement de l’âme du canon avec le barillet ;
- de son passage dans le canon ;
- des ricochets ;
- de son passage d’un obstacle ;
- de l’impact avec la cible finale ;

Afin de donner plus de précision au tir et d’assurer un transfert maximal de l’énergie de la combustion de la poudre au projectile, le canon des armes de poing présente des rayures et un diamètre intérieur légèrement inférieur de celui du projectile. En raison de la présence de ces rayures et la différence de diamètre entre le projectile et la lumière du canon, les champs et les rayures de ce dernier enlèvent la matière de la surface du projectile lors de son passage. Cet enlèvement est plus profond pour les champs que pour les rayures. Ces traces laissées par les rayures et les champs du canon sont appelées respectivement les impressions de champs et les impressions de rayures.

l’*AFTE* subdivise les caractéristiques (traces laissées sur les éléments de munition) dans trois catégories. Les caractéristiques de *classe*, *individuelles* et de *sous-classe*. Plus bas nous donnons leur définition originale sans entamer une analyse critique de celles-ci. Cette analyse se fera dans un chapitre dédié au moment où la nouvelle définition de la signature balistique sera proposée pour répondre aux limites des définitions proposées par l’*AFTE*.

#### 2.1.1 Caractéristiques *de classe* (ou issues de la fabrication)

Il s’agit de caractéristiques communes à tous les outils de même type, issus de la même fabrication.<sup>1</sup> Dans le cas de projectiles, lors du tir, la température et la pression engendrée par l’inflammation de la poudre, provoquent l’expansion des gaz et le projectile est propulsé à travers du canon. Durant ce processus, les caractéristiques de fabrication du canon de l’arme seront laissées sur le projectile. Elles peuvent être caractérisées par les attributs suivants : le nombre d’impressions des champs, la largeur d’impressions des champs, le pas et le sens de rotation des impressions des champs.

<sup>1</sup>Selon l’*AFTE*: « *Measurable feature of a specimen that indicate a restricted group source; they result from design factors, and therefore determined prior to manufacture* ».

### 2.1.2 Caractéristiques dites *individuelles*

Ces caractéristiques peuvent être permanentes ou non permanentes. Il peut y avoir une évolution de ces caractéristiques avec le temps et la fréquence d'utilisation. Ce sont généralement des stries dans les impressions des champs et les impressions des rayures.<sup>2</sup>

Après la fabrication du canon, ces caractéristiques qui trouvent leur origine à l'intérieur du canon changent avec le temps et l'usage de l'arme (Skolrood 1975). Ces changements sont dus essentiellement à la corrosion, à l'érosion et à d'autres facteurs et certaines s'installent de manière aléatoire et deviennent particulières pour chaque canon.

De manière générale, la qualité et la quantité des traces laissées par les outils sur les surfaces sont dépendant de quatre facteurs: la dureté relative entre l'outil et la surface, le caractère de la surface d'outil, l'ampleur de la pression de l'outil sur la surface et le mouvement relatif entre l'outil et la surface. Parmi ces facteurs, le caractère de la surface la plus dure, soit dans notre cas le canon, est considéré comme constant. La dureté relative dépend considérablement de la surface de projectile et il a été souvent constaté des variations de dureté entre les projectiles même parmi ceux issus du même lot de fabrication. L'intensité de la pression entre le canon et le projectile dépend aussi de la charge propulsive de la cartouche, qui peut varier d'un projectile à l'autre du même lot. L'intensité de la pression change considérablement si l'on utilise des projectiles sous-calibrés ou sur calibrés, ce qui implique des stries plus profondes ou des stries plus superficielles, d'où la présence de certaines stries sur un projectile et leur absence sur d'autres projectiles, quand bien même sont-ils tirés par la même arme (Kirby 1983). Par contre, Lindsay (Lindsay 2000) a constaté qu'une diminution de 50% de la charge propulsive n'influence pas la capacité d'un ou d'une spécialiste à procéder à l'identification.

### 2.1.3 Caractéristiques de *sous-classe*

Ces caractéristiques ne sont pas intentionnelles, au sens où elles ne sont pas issues d'une conception planifiée du fabricant, mais elles ne sont pas non plus propres à un seul outil, car elles peuvent être partagées par plusieurs outils, souvent lorsque ceux-ci sont manufacturés consécutivement (mais cela n'en est pas une condition).<sup>3</sup> Par exemple, (Lomoro 1972) a constaté la présence de caractéristiques de sous-classe sur 1000 différents canons de calibre .32 SW. (Murdock 1981) relève la présence de caractéristiques de sous-classe sous la forme de lignes grossières et des lignes fines sur des projectiles tirés par des canons .22LR fabriqués consécutivement. Ces caractéristiques se forment lors du processus de fabrication selon une méthode de production analogue, qui mène à des similarités apparentes. Il faut relever qu'à ce jour, il n'y a pas moyen de distinguer les caractéristiques de sous-classe des caractéristiques dites individuelles.

## 2.2 Les différentes approches de l'identification de projectiles

Dans le domaine des armes à feu, le concept de l'inférence de l'identité de la source (*identification*) est utilisé afin d'exprimer la relation entre un élément de munition et une arme. L'identification est une conclusion qui stipule que c'est cette arme qui a tiré l'élément de munition (et donc est la cause des traces observées sur l'élément) à l'exclusion de toute autre arme à feu potentielle y compris celles qui partagent les mêmes caractéristiques de classe. L'identification s'appuie notamment sur la comparaison entre les caractéristiques dites individuelles révélées sur la trace indiciaire et celles révélées sur les traces de comparaison. Il est utile de signaler que dans sa définition usuelle, le mot *identification* signifie la connaissance de la composition physique ou chimique d'une matière. Par exemple, un produit chimique est *identifié* comme étant du NaCl. Mais, par abus d'usage, dans le domaine forensique, le mot *identification* signifie, l'individualisation d'un objet comme étant la seule source d'une trace. Ce particularisme se retrouve dans d'autres domaines forensiques comme la dactyloscopie (Champod et al. 2016) ou l'expertise en matière de traces de semelles (Girod, Champod, and

<sup>2</sup>Selon l'AFTE: « *Are imperfections or irregularities produced accidentally during manufacture or caused by use, abuse, corrosion, rust, or damage to an object. They are unique to that object and distinguish it from all other objects* ».

<sup>3</sup>L'AFTE décrit les caractéristiques de sous-classe comme « *Are surface features that are more restrictive than class characteristics, are produced incidental to manufacture, relate to a smaller group source, and can arise from a source that changes over time* ».

Ribaux 2008). Les critiques quant à l'usage abusif du terme identification a été largement relayée par Simon Cole (S. A. Cole 2014) et s'applique également au domaine en examen ici. Dans le domaine de l'expertise d'arme à feu et traces d'outils, il existe quatre approches utilisées dans l'inférence de l'identité de la source. La première est l'approche classique qui utilise l'échelle associée à la théorie d'identification du comité de l'*AFTE*. La deuxième est une mise à jour de l'approche de l'*AFTE* par le département de la justice des États-Unis (DOJ). La troisième se base sur un critère quantitatif sous la forme d'un seuil minimal des stries consécutives concordantes (appelé CMS) nécessaire à une identification. La dernière utilise le rapport de vraisemblance et un processus décisionnel.

### 2.2.1 L'approche préconisée par l'*AFTE*

C'est l'approche la plus ancienne et la plus utilisée par les spécialistes en matière d'identification des traces d'outils et d'armes à feu. Le critère le plus important dans cette approche est le degré de compatibilité dans les caractéristiques dites individuelles entre les surfaces de deux éléments de munition (étant entendu une correspondance au niveau des caractéristiques de classe). Selon l'*AFTE* (AFTE Criteria for Identification Committee 1992), le ou la spécialiste peut aboutir, après la comparaison entre la pièce indiciaire et la pièce de comparaison, à l'une des quatre conclusions suivantes :

- **Identification:** est la conclusion faisant suite à l'observation d'une compatibilité dans la combinaison des caractéristiques individuelles et toutes les caractéristiques de classe, dont le degré de compatibilité est supérieur à celui de la meilleure compatibilité issue des comparaisons entre deux traces laissées par deux outils différents, et cohérent avec la compatibilité observée entre deux traces laissées par le même outil.<sup>4</sup>
- **Indéterminé:** Cette conclusion peut être prononcée dans l'un des trois cas suivants :
  1. Lorsque quelques compatibilités sont observées au niveau des caractéristiques individuelles et des caractéristiques de classe, mais elles sont insuffisantes pour conclure à une identification.<sup>5</sup>
  2. Lors de l'observation d'une compatibilité dans toutes les caractéristiques de classe sans compatibilité au niveau des caractéristiques individuelles, en raison de leur absence, leur insuffisance ou leur manque de reproductibilité.<sup>6</sup>
  3. En cas de compatibilité dans toutes les caractéristiques de classe et des incompatibilités au niveau des caractéristiques individuelles, mais ne permettant pas une exclusion.<sup>7</sup>
- **Exclusion :** Cette conclusion est prononcée lorsqu'une incompatibilité significative dans les caractéristiques de classes et/ou les caractéristiques individuelles est observée.<sup>8</sup>
- **Inadapté:** la pièce indiciaire n'est pas suffisante pour une comparaison.<sup>9</sup>

### 2.2.2 L'approche du département de la justice des États-Unis (DOJ)

Cette approche (Department of Justice 2018), adoptée en 2018 par le département de la justice des États-Unis, est une version mise à jour de l'approche de l'*AFTE*, par laquelle l'examineur(-trice) peut aboutir l'une des trois conclusions suivantes :

<sup>4</sup>La version anglaise se lit: « *Agreement of a combination of individual characteristics and all discernible class characteristics where the extent of agreement exceeds that which can occur in the comparison of tool marks made by different tools and is consistent with the agreement demonstrated by toolmarks known have to be produced by the same tool* ».

<sup>5</sup>En anglais: « *Some agreement of individual characteristics and a discernible class characteristics, but insufficient for an identification* ».

<sup>6</sup>En anglais: « *Agreement of all discernible class characteristics without agreement or disagreement of individual characteristics due to an absence, insufficiency, or lack of reproducibility* ».

<sup>7</sup>En anglais: « *Agreement of all discernible class characteristics and disagreement of individual characteristics, but insufficient for an elimination* ».

<sup>8</sup>En anglais: « *Significant disagreement of discernible class characteristics and/ or individual characteristics* ».

<sup>9</sup>En anglais: « *Unsuitable for comparison* ».

**2.2.2.1 Identification de la source:** Une concordance dans toutes les caractéristiques de classe observées. De plus, la qualité et la quantité des caractéristiques individuelles concordantes sont telles que l’examineur ne s’attend pas à trouver la même combinaison de caractéristiques individuelles générées par une autre source. Par ailleurs les discordances observées au niveau des caractéristiques individuelles sont insuffisantes pour conclure qu’ils provenaient de sources différentes.<sup>10</sup>

Pour ce qui est de l’identification de la source, le DOJ se démarque de l’*AFTE* par les trois points suivants:

1. Selon le DOJ, la conclusion «*identification de la source*» est présentée comme une décision d’un examinateur(-trice) selon laquelle les caractéristiques de classe observées et les caractéristiques individuelles correspondantes fournissent un *soutien extrêmement fort* pour la proposition selon laquelle les deux marques d’outils provenaient de la même source et un *soutien extrêmement faible* pour la proposition selon laquelle les deux traces d’outils sont venues de différentes sources.<sup>11</sup> Le DOJ s’écarte donc de la certitude affichée par la même conclusion selon l’*AFTE*. Les documents préliminaires du groupe spécialisé sur les traces d’outils et d’armes à feu du *Firearms and Toolmarks Subcommittee, Physics/Pattern Interpretation Scientific Area Committee, Organization of Scientific Area Committees (OSAC) for Forensic Science* vont dans le même sens (Firearms and Toolmarks Subcommittee 2019).
2. Une «*identification de source*» est l’expression de l’opinion d’un examinateur(-trice), par inférence inductive, selon laquelle la probabilité que les deux traces d’outils aient été créées par des sources différentes est *si faible qu’elle est négligeable*. Une «*identification de la source*» ne se base pas sur une mesure statistique vérifiée ou sur une comparaison réelle avec toutes les armes à feu ou outils de la population pertinente.<sup>12</sup> L’*AFTE* invite à considérer systématiquement et empiriquement le degré maximal d’association observé entre des entités de sources différentes. Ce degré devenant de facto le critère empirique permettant, lorsqu’il est dépassé, d’identifier. Le DOJ ou l’OSAC invite à évaluer la probabilité d’une association fortuite sans définir le critère empirique qui doit être satisfait. À noter que la position du DOJ a été critiquée par Cole et Biedermann (S. Cole and Biedermann 2020) qui relève la confusion créée entre une probabilité jugée négligeable et la décision d’un ou d’une spécialiste.
3. L’*AFTE* n’envisage pas de pondérer les dissemblances dans l’évaluation du cas menant à une identification. Si elles sont observées, une exclusion est déclarée, sinon elle n’existe pas. Le DOJ, par contre, reconnaît que des dissemblances sont toujours présentes et que leur poids doit être apprécié au même titre que les concordances dans les considérations menant à une identification de la source.

**2.2.2.2 Exclusion de la source:** L’exclusion est la conclusion d’un examinateur(-trice) selon laquelle deux traces d’outils ne proviennent pas de la même source. La base de cette décision d’«*exclusion de la source*» est l’observation selon laquelle les traces d’outils peuvent être différenciées selon leurs caractéristiques de classe et/ou leurs caractéristiques individuelles.<sup>13</sup>

**2.2.2.3 Indéterminé:** *Indéterminé* est la conclusion de l’examineur(-trice) selon laquelle toutes les caractéristiques de classe observées sont concordantes, mais, que la qualité et/ou la quantité des caractéris-

<sup>10</sup>En anglais: « *‘Source identification’ is an examiner’s conclusion that two toolmarks originated from the same source. This conclusion is an examiner’s decision that all observed class characteristics are in agreement and the quality and quantity of corresponding individual characteristics is such that the examiner would not expect to find that same combination of individual characteristics repeated in another source and has found insufficient disagreement of individual characteristics to conclude they originated from different sources* ».

<sup>11</sup>En anglais: « *The basis for a ‘source identification’ conclusion is an examiner’s decision that the observed class characteristics and corresponding individual characteristics provide extremely strong support for the proposition that the two toolmarks came from the same source and extremely weak support for the proposition that the two toolmarks came from different sources.* ».

<sup>12</sup>En anglais: « *A ‘source identification’ is the statement of an examiner’s opinion (an inductive inference) that the probability that the two toolmarks were made by different sources is so small that it is negligible. A ‘source identification’ is not based upon a statistically-derived or verified measurement or an actual comparison to all firearms or toolmarks in the world.* »

<sup>13</sup>En anglais: « *‘Source exclusion’ is an examiner’s conclusion that two toolmarks did not originate from the same source. The basis for a ‘source exclusion’ conclusion is an examiner’s decision that two toolmarks can be differentiated by their class characteristics and/or individual characteristics* ».

tiques individuelles correspondantes sont insuffisantes, de sorte que l'examineur(-trice) n'est pas en mesure d'identifier ou d'exclure les traces d'outils comme provenant de la même source.<sup>14</sup>

La base d'une conclusion «*indéterminée*» est la décision de l'examineur(-trice) selon laquelle la qualité et/ou la quantité de caractéristiques dites individuelles à identifier ou à exclure sont insuffisantes. Les raisons d'une conclusion «*indéterminée*» comprennent la présence d'une similitude microscopique qui est insuffisante pour aboutir à la conclusion d'«*identification de la source*» ; l'absence de toute similitude microscopique observée; ou une dissemblance microscopique insuffisante pour conclure à une «*exclusion de la source*».<sup>15</sup>

Ces deux dernières conclusions sont les mêmes que celles correspondantes de l'*AFTE*.

Dans sa directive, le DOJ a défini les qualifications et les limites du domaine de l'examen des armes à feu et traces d'outils en fournissant les précisions suivantes qui témoignent de la distance bienvenue prise par rapport aux positions de l'*AFTE*:

1. Une conclusion fournie lors d'un témoignage ou dans un rapport est en fin de compte une décision de l'examineur(-trice) et elle n'est pas basée sur une mesure statistique ou une comparaison avec toutes les autres armes à feu ou traces d'outils. Par conséquent, un-e spécialiste ne doit pas:
  - affirmer qu'une «*identification de la source*» ou une «*exclusion de la source*» est fondée sur le «*caractère unique*» d'un élément de question.<sup>16</sup>
  - utiliser les termes «*individualiser*» ou «*individualisation*» pour décrire une *identification de la source*.<sup>17</sup>
  - affirmer que deux traces d'outils proviennent de la même source à l'exclusion de toutes les autres sources possibles.<sup>18</sup>
2. Un examineur(-trice) ne doit pas affirmer que les examens effectués dans la discipline des armes à feu / traces d'outils sont infaillibles ou qu'ils ont un taux d'erreur nul.<sup>19</sup>
3. Un examineur(-trice) ne doit pas fournir une conclusion suggérant un degré de probabilité statistique ou numérique, sauf si elle est fondée sur des données pertinentes et appropriées.<sup>20</sup>
4. Un examineur(-trice) ne doit pas citer le nombre d'examens effectués, durant sa carrière dans la discipline des armes à feu / traces d'outils, comme mesure directe de l'exactitude d'une conclusion fournie. Un examineur(-trice) peut citer le nombre d'examens effectués, durant sa carrière dans la discipline des armes à feu / traces d'outils, dans le but d'établir, de défendre ou de décrire ses qualifications ou son expérience.<sup>21</sup>
5. Un examineur(-trice) ne doit pas affirmer, avec une certitude absolue ou à 100%, que deux traces d'outils proviennent de la même source, ni d'utiliser les expressions (*degré raisonnable de certitude scientifique*), (*certitude scientifique raisonnable*), ou des affirmations similaires de certitude raisonnable

---

<sup>14</sup>En anglais « *'Inconclusive' is an examiner's conclusion that all observed class characteristics are in agreement but there is insufficient quality and/or quantity of corresponding individual characteristics such that the examiner is unable to identify or exclude the two toolmarks as having originated from the same source* ».

<sup>15</sup>En anglais: « *The basis for an 'inconclusive' conclusion is an examiner's decision that there is an insufficient quality and/or quantity of individual characteristics to identify or exclude. Reasons for an 'inconclusive' conclusion include the presence of microscopic similarity that is insufficient to form the conclusion of 'source identification'; a lack of any observed microscopic similarity; or microscopic dissimilarity that is insufficient to form the conclusion of 'source exclusion.'* ».

<sup>16</sup>En anglais: « *assert that a 'source identification' or a 'source exclusion' conclusion is based on the 'uniqueness' of an item of evidence.* ».

<sup>17</sup>En anglais: « *use the terms 'individualize' or 'individualization' when describing a source conclusion.* ».

<sup>18</sup>En anglais: « *assert that two toolmarks originated from the same source to the exclusion of all other sources.* ».

<sup>19</sup>En anglais: « *An examiner shall not assert that examinations conducted in the forensic firearms/toolmarks discipline are infallible or have a zero error rate.* ».

<sup>20</sup>En anglais « *An examiner shall not provide a conclusion that includes a statistic or numerical degree of probability except when based on relevant and appropriate data.* ».

<sup>21</sup>En anglais: « *An examiner shall not cite the number of examinations conducted in the forensic firearms/toolmarks discipline performed in his or her career as a direct measure for the accuracy of a conclusion provided. An examiner may cite the number of examinations conducted in the forensic firearms/toolmarks discipline performed in his or her career for the purpose of establishing, defending, or describing his or her qualifications or experience.* ».

dans les rapports ou les témoignages, à moins qu'il est tenu de le faire par un juge ou par la loi applicable.<sup>22</sup>

Le groupe spécialisé de l'OSAC adopte une attitude prudente analogue à celle du DOJ dans son document actuellement en consultation (Firearms and Toolmarks Subcommittee 2019).

### 2.2.3 L'approche CMS

Cette approche CMS a vu le jour à la suite des travaux de recherche empiriques de Alfred Biasotti (Biasotti 1959). Biasotti a indiqué que le nombre des stries concordantes consécutives, c'est-à-dire pouvant être décomptées les unes après les autres sans stries non concordantes entre-elles, est plus significatif que le nombre total des stries concordantes ou le pourcentage des stries concordantes. Ainsi, Biasotti propose qu'un-e spécialiste utilise le nombre des stries concordantes consécutives comme critère d'identification dans la comparaison entre les projectiles. Biasotti et Murdock (Biasotti and Murdock 1997) ont proposé concrètement ces seuils numériques selon la morphologie des stries, pour l'identification dans le domaine des traces d'outils et des armes à feu. Ils s'articulent comme suit :

- Dans le cas des traces tridimensionnelles, et après avoir exclu une influence potentielle des caractéristiques de sous-classe, il faut avoir au moins la présence dans la même position relative, de deux groupes différents dans lesquels il y a au moins trois stries concordantes consécutives, ou la présence d'un groupe de six stries concordantes consécutives, dans la comparaison entre la trace indiciaire et la trace de comparaison.<sup>23</sup>
- Dans le cas des traces bidimensionnelles, et sous la même contrainte quant aux caractéristiques de sous-classe, il faut avoir au moins la présence dans la même position relative, de deux groupes différents dans lesquels il y a au moins cinq stries concordantes consécutives, ou la présence d'un groupe de huit stries concordantes consécutives, dans la comparaison entre la trace indiciaire et la trace de comparaison.<sup>24</sup>

### 2.2.4 L'approche basée en partie sur un rapport de vraisemblance (LR)

Le rapport de vraisemblance est une méthode d'évaluation probabiliste de la trace matérielle. Elle offre un mécanisme cohérent de mise à jour des croyances sur la question de l'identité de source après avoir bénéficié des résultats de la comparaison entre typiquement les traces laissées sur l'élément de munition de question et les traces obtenues sur les éléments de référence. Ce mode de mise à jour n'est pas nouveau et constitue la pierre fondatrice de l'approche dite bayésienne largement plébiscitée dans la littérature forensique (Aitken, Taroni, and Bozza 2020) (Robertson, Vignaux, and Berger 2016). Les organes de coopération forensique comme l'*European Network of Forensic Science - ENFSI* (Willis 2015) ou le régulateur forensique en Angleterre (Chartered Society of Forensic Sciences and Royal Statistical Society 2021) encourage les services à adopter un mode de transmission des résultats sous la forme d'un rapport de vraisemblance tel que nous le définirons plus bas.

Suite aux examens forensiques, le juge et les jurés (de manière générale, le preneur de décision) veulent apprécier dans quelle mesure l'arme à feu est effectivement la source des éléments de munition. En termes de probabilités, et pour prendre un cas impliquant une arme saisie (Champod et al. 2003), ils veulent apprécier la grandeur du rapport entre deux termes suivants: - Le premier est la probabilité que l'arme saisie soit

---

<sup>22</sup>En anglais: « *An examiner shall not assert that two toolmarks originated from the same source with absolute or 100% certainty, or use the expressions 'reasonable degree of scientific certainty,' 'reasonable scientific certainty,' or similar assertions of reasonable certainty in either reports or testimony unless required to do so by a judge or applicable law* ».

<sup>23</sup>En anglais: « *In three dimensional toolmarks when at least two different groups of at least three consecutive matching striae appear in the same relative position, or one group of six consecutive matching striae are in agreement in an evidence toolmark compared to a test toolmark. This is predicated on the understanding that all subclass influence has been ruled out* ».

<sup>24</sup>En anglais: « *In two dimensional toolmarks when at least two different groups of at least five consecutive matching striae appear in the same relative position, or one group of eight consecutive matching striae are in agreement in an evidence toolmark compared to a test toolmark. This is predicated on the understanding that all subclass influence has been ruled out* ».

la source de l'élément de munition de question en tenant en compte les résultats de l'analyse et du cadre circonstanciel technique spécifique à l'affaire. - Le deuxième est la probabilité que l'arme saisie ne soit pas la source de la trace en tenant en compte les résultats de l'analyse et du cadre circonstanciel technique spécifique à l'affaire (Bunch and Wevers 2013).

En désignant:

$I$ : le cadre circonstanciel technique et spécifique à l'affaire, qui permet de déterminer les spécificités et la taille de la population pertinente des armes pouvant être à l'origine du tir.

$E$ : les résultats des examens forensiques, plus spécifiquement le relevé des concordances et des discordances observées entre les traces relevées sur l'élément de munition de question et celles sur les éléments de référence.

$H_0$ : l'hypothèse que l'arme saisie a tiré l'élément de munition de question (et donc produit les traces relevées sur celui-ci).

$H_1$ : l'hypothèse que l'arme saisie n'est pas l'élément de munition de question, mais il a été tirée par une autre arme inconnue issue de la population pertinente.

Le rapport entre les deux termes  $P(H_0|E, I)$  et  $P(H_1|E, I)$  représente les chances a posteriori,<sup>25</sup> alors que le rapport entre les deux termes  $P(H_0|I)$  et  $P(H_1|I)$ , représente les chances a priori.<sup>26</sup> Selon le théorème de Bayes, il est possible de décrire la relation entre les deux rapports selon l'équation suivante:

$$\frac{P(H_0|E, I)}{P(H_1|E, I)} = \frac{P(E|H_0, I) P(H_0|I)}{P(E|H_1, I) P(H_1|I)}$$

Le terme  $\frac{P(E|H_0, I)}{P(E|H_1, I)}$  est communément nommé le rapport de vraisemblance «*Likelihood Ratio: LR*» en anglais. EN anglais, il est aussi décrit comme le *Bayes factor - BF*. Pour le besoin de cette recherche, nous utiliserons le rapport de vraisemblance et l'acronyme *LR*.

Donc, **les chances a posteriori** = *LR* x **les chances a priori** (Lindley 1977).

$P(E|H_0, I)$ : est la probabilité de faire l'ensemble des observations (concordances et discordances) durant la comparaison dans l'hypothèse d'une source commune. Cette probabilité est informée par ce qui est nommé *l'intravariabilité* des observations, c'est-à-dire des variations observées entre les traces sur des éléments de munition tirés par l'arme d'intérêt.

$P(E|H_1, I)$ : est la probabilité de faire l'ensemble des observations (concordances et discordances) durant la comparaison dans l'hypothèse de sources distinctes. Cette probabilité est informée par ce qui est nommé *l'intervariabilité* des observations, c'est-à-dire des variations observées entre les traces sur des éléments de munition tirés par des armes différentes issues du groupe d'armes potentielles.

Le *LR* résume la contribution des résultats de l'examen forensique. Si le *LR* est supérieur à 1, le résultat de la comparaison entre l'élément de munition de question et le matériel de référence viendra à l'appui de l'hypothèse  $H_0$ , tandis que, s'il est inférieur à 1, ce résultat viendra à l'appui de l'hypothèse  $H_1$ . Par contre, si le *LR* est égal à 1, ce résultat ne favorisera aucune des deux hypothèses considérées, les résultats ne parviennent effectivement pas à discriminer les hypothèses en examen. À notre connaissance, cette approche basée sur le *LR* n'est utilisée en routine qu'à l'Institut forensique des Pays-Bas (*Netherlands Forensic Institute, NFI*), à l'École des Sciences Criminelles (*ESC*) de l'université de Lausanne et au Centre forensique national de Suède (*National Forensic Centre, NFC*) (Kerkhoff et al. 2013).

De la présentation des quatre approches présentées ci-dessus, il est possible de faire ressortir les points de contraste suivants:

- L'approche adoptée par le DOJ est une amélioration par rapport à l'approche de l'*AFTE* (Kaye 2020). En effet, elle n'impose plus la nécessité de distinguer les caractéristiques de sous-classe des caractéristiques dites individuelles et elle clarifie la signification du terme identification en évitant toute référence à une certitude factuelle. La subjectivité de l'approche demeure et en reste sa faiblesse.

---

<sup>25</sup>En anglais: « *posterior odds* »

<sup>26</sup>En anglais: « *prior odds* »

- Afin de conclure à une identification, l'approche *CMS* fixe des seuils quantitatifs, couplés à une évaluation qualitative de la trace (la distinction entre des stries *2D* et des traces en *3D*), malgré qu'une trace *2D* n'existe pas en réalité. Toutefois, outre le manque d'une définition précise de la strie, la classification des traces en *2D* ou *3D* est conditionnée par le type d'éclairage et le grossissement utilisés, et elle peut être différente d'un examinateur à l'autre. Selon les promoteurs de l'approche *CMS* (Miller 1998) (Miller 2000) (Moran 2001), aucune fausse identification n'a été déclarée suite l'application des critères retenus. En revanche, elle souffre d'un nombre important de fausses exclusions, étant donné qu'il existe peu de projectiles tirés par la même arme qui peuvent satisfaire les seuils imposés par l'approche *CMS*. Finalement, l'approche *CMS* n'est pas totalement prescriptive, car l'expert-e peut dévier des critères fixés et conclure à une identification lorsqu'il estime que l'approche n'est finalement pas adaptée à son cas (Moran 2003). Dans ce cas, l'approche de l'*AFTE* est appliquée par défaut.
- Quant à l'approche basée sur le rapport de vraisemblance *LR*, qui a connu une adoption généralisée dans le domaine des traces biologiques (et plus particulièrement en matière de génétique forensique), à notre connaissance, elle n'est pratiquée dans le domaine des armes à feu que par quelques laboratoires (Kerkhoff et al. 2013). Le *LR* exprimé dans leurs rapports est assigné dans une large mesure par une appréciation subjective des probabilités associées aux observations sans référence à des données structurées. Le progrès est donc conceptuel, mais ne résout pas en l'état la question de la subjectivité de la discipline. Parmi les spécialistes du domaine, elle n'a pas gagné en popularité, probablement en raison d'un traditionalisme et du confort de l'approche proposée par l'*AFTE*.

### 2.3 Critiques de la discipline par la communauté scientifique et académique

Comme cela été le cas pour les différentes disciplines de la criminalistique, le domaine de l'identification d'armes à feu a été dans l'obligation de s'adapter à l'évolution des critères d'admissibilité de l'expertise scientifique devant les tribunaux, à tout le moins aux États-Unis d'Amérique. Dans les autres pays, l'évolution est anecdotique et surtout nourrie par le débat aux USA. C'est pour cette raison que nous allons nous attarder plus longuement sur la situation américaine. Elle est d'autant plus intéressante que la procédure américaine prévoit une procédure d'admissibilité formelle des preuves de nature scientifique. Ce type de procédure se retrouve aussi au Canada et dans une moindre mesure au Royaume-Uni. Par contre, dans les autres procédures, à notre connaissance, le principe de la liberté des preuves prévaut. Cela signifie que la question de l'assise scientifique de la discipline est peu débattue dans les autres systèmes judiciaires que les systèmes accusatoires de *common law*.

La question de l'admissibilité de la preuve scientifique aux États-Unis est passée par trois phases. Durant la première phase jusqu'en 1923, est considéré-e comme expert-e celui qui apporte des éléments techniques par l'application de pratiques spécialisées qui n'étaient pas à disposition du tribunal. La reconnaissance professionnelle était alors une condition suffisante pour attester des compétences. La deuxième phase fait suite dès 1923 à l'arrêt de Frye et a assujetti la question de l'admissibilité à une nouvelle exigence: l'expertise scientifique est admise si elle est basée sur des connaissances généralement admises par la communauté des spécialistes (la communauté des pairs). La troisième phase débute en 1993 suite à l'arrêt Daubert rendu par la Cour Suprême des États-Unis. Cet arrêt a complété la condition des connaissances généralement admises posée par l'arrêt Frye, par quatre conditions d'admissibilité complémentaires. Plus spécifiquement :

1. la technique ou la théorie utilisée par l'expert-e a été (ou peut-être) testée, car une théorie est dite scientifique lorsqu'elle a l'aptitude de se soumettre à une expérience scientifique susceptible d'un résultat négatif ou positif ;
2. la théorie ou la technique utilisée a donné lieu à une évaluation par les pairs et a fait l'objet de publications dans des revues expertisées ;
3. le pourcentage d'erreurs potentiel est connu dans l'application de la technique ou de la théorie ;
4. la reconnaissance de la technique ou la théorie utilisée par la communauté scientifique.

À la lumière de l'arrêt de Daubert, plusieurs voix ont remis en cause l'admissibilité de l'expertise en armes à feu. Les plus fameuses critiques sont celles émises par la professeure Adina Schwartz, le *National Research*

*Council (NRC)* et le *President's Council of Advisors on Science and Technology (PCAST)*. D'autres auteurs (Spiegelman and Tobin 2012) (Tobin and Blau 2013) ont également contribué à ce débat, mais de manière plus marginale ou en complément aux positions exprimées par les précédents acteurs ou organes.

Ces critiques sont brièvement résumées ci-après.

### 2.3.1 La critique par Adina Schwartz

Dans ses articles (Schwartz 2005a) (Schwartz 2005b), Adina Schwartz a énuméré trois causes majeures d'une fausse identification, à savoir: 1) les caractéristiques dites individuelles sont composées de traces dont l'unicité n'a jamais été démontrée, 2) les caractéristiques de sous-classe et les caractéristiques dites individuelles sont indiscernables malgré ce qu'en disent les spécialistes et 3) que ces dernières changent continuellement avec le temps et l'usage de l'arme. Dans ce contexte, Schwartz met en avant les arguments critiques suivants:

- l'existence de différences entre les traces issues de la même source, et la possibilité d'observer des ressemblances entre les traces laissées par des sources différentes implique qu'il faut répondre de manière probabiliste et non déterministe à la question de savoir si une arme en particulier est ou non à l'origine d'un élément de munition;
- l'absence d'études statistiques évaluant la probabilité qu'une caractéristique dite individuelle soit produite par un outil choisi aléatoirement;
- l'absence de tests de compétences adéquats dans le domaine de l'identification d'armes à feu (et des traces d'outils). À noter que les résultats des tests récents ne sont pas très rassurants pour la discipline (Hofmann, Carriquiry, and Vanderplas 2020) (E. J. A. T. Mattijssen et al. 2021a) (Law and Morris 2021).

Ces points sont selon Schwartz des arguments suffisants pour exclure l'admissibilité des rapports d'identification d'armes à feu et de traces d'outils devant les tribunaux dans leur mode de présentation actuel.

Afin de défendre l'admissibilité du domaine et répondre aux critiques de Schwartz, Ron Nichols s'est appuyé sur les travaux de recherche empiriques réalisés dans les différents sujets critiqués par Schwartz, à savoir, le principe de l'identification, les caractéristiques de sous-classe, la variabilité des caractéristiques dites individuelles, et les tests de compétences (Nichols 2007). Pour minimiser l'aspect subjectif de la discipline, Nichols souligne que les critères de l'identification sont à la fois subjectifs et objectifs. Car, selon lui, dans sa décision d'identification, l'expert-e donne une interprétation subjective à ses observations objectives. Quant à la capacité des spécialistes de détecter la meilleure ressemblance entre les traces de différents outils (*Best-known nonmatch*), Nichols argumente que les tests de compétence montrent qu'elle est excellente. Force est de constater que les réponses offertes par Nichols ne réduisent en rien la force de la critique quant à la subjectivité de la discipline.

### 2.3.2 Les rapports du National Research Council (NRC)

Dans ses deux rapports publiés (Committee to Assess the Feasibility Accuracy and National Ballistics Database 2008) (National Research Council 2009), le NRC a remis en cause les deux prémisses régissant le domaine de l'identification des armes à feu, à savoir l'individualité et la reproductibilité des traces laissées par une arme sur les éléments de munition tirés. Selon les deux rapports, jusqu'à nos jours, il n'y a aucune étude statistique qui a été réalisée à une grande échelle, pour vérifier l'impossibilité de la présence fortuite de similitudes significatives entre des traces laissées par deux armes différentes. De même, il n'y a aucune recherche empirique qui a été effectuée afin de mesurer la reproductibilité des traces laissées par les différents types d'armes à feu. Donc, outre la subjectivité de l'examen et le manque de la vérification de ces deux prémisses, l'expert-e quand il/elle conclut une identification, la prononce avec une certitude absolue, une posture rhétorique qui, selon le NRC, fragilise l'admissibilité de l'identification des armes à feu devant les tribunaux.

### 2.3.3 Le rapport du President’s Council of Advisors on Science and Technology (PCAST)

Outre les remarques révélées par les deux précédents rapports, le rapport du PCAST (Advisors on Science & Technology 2016) a mis l’accent sur le problème du manque de tests de compétence fiables pour estimer les taux d’erreur (fausses identifications et fausses exclusions) dans les conclusions des spécialistes. Selon ce rapport il n’existe qu’une seule étude pertinente réalisée (Baldwin 2014) par laquelle un taux d’erreur (faux positif) de 1 sur 66 a été enregistré suite à un test distribué à 218 spécialistes.

## 2.4 Les travaux de recherche effectués sur les projectiles et les traces glissées

Afin de faire face au grand nombre d’affaires cumulées au niveau des laboratoires forensiques impliquant des armes à feu et des éléments de munition et de répondre aux requérants en temps opportun, il est judicieux de penser à l’automatisation des différentes étapes du processus, à savoir, la numérisation, la comparaison et l’interprétation. Suite à l’adoption des critères Daubert, et à l’ampleur des critiques envers le domaine, il est apparu indispensable que la communauté des chercheurs et spécialistes réalise des études et des recherches dans le but de minimiser au maximum la subjectivité de la discipline par l’automatisation des examens balistiques.

Le tableau 1 dresse les travaux de recherche les plus importants effectués dans l’automatisation de l’identification de projectiles, les techniques d’acquisition et d’extraction de caractéristiques, et les méthodes de comparaison. Il est utile de signaler que ces trente (30) travaux de recherche, illustrés par la figure 1, sont subdivisés, selon les techniques d’acquisitions, en deux groupes (optique et non optique), et selon le type de données dans deux groupes (2D ou 3D). Ils sont aussi classés, selon les techniques d’extraction de caractéristiques, en deux groupes (les différentes transformées: Hough, Fourier, Radon et ondelettes, et les descripteurs de la texture). Ils sont également classés, selon les méthodes de comparaison, en trois groupes (comparaison directe par l’utilisation des fonctions de corrélation pour l’évaluation de la similarité, des fonctions de distance pour mesurer la dissemblance, ou par la modélisation par les techniques de l’apprentissage automatique).

Du tableau 1 il est possible de constater que la plupart des travaux ont été effectués sur un nombre très limité d’échantillons. Ainsi sur la base de ces données, toute tentative de prédire les performances de la méthode sur d’autres échantillons est hasardeuse. Pour ce qui est de la Kalashikov, un échantillon important de 90 armes a été utilisé dans (Hesar, Bigeli, and Moghaddam 2019) en exploitant comme métrique de comparaison entre deux projectiles la fonction de corrélation croisée circulaire normalisée. Néanmoins, l’étude présente le taux des bons classements dans les 9 premiers rangs (77,49%), sans préciser le taux des fausses identifications. Les meilleurs taux d’identification (entre 91,18% et 98,41%) ont été obtenus par (Pisantanaroj et al. 2020), en tirant profit de technique de *deep learning* dans l’extraction des caractéristiques et la modélisation. Toutefois, la taille de l’échantillonnage reste très limitée (8 armes à feu) pour un total de 898 projectiles (plus de 200 projectiles de référence par arme). En l’état, cela empêche l’application opérationnelle de cette technique. Les recherches sur l’automatisation de l’examen des projectiles existent et traduisent des volontés ponctuelles d’améliorer la discipline, mais aucune des recherches entreprises à ce jour n’est en mesure de répondre opérationnellement aux critiques posées plus haut.

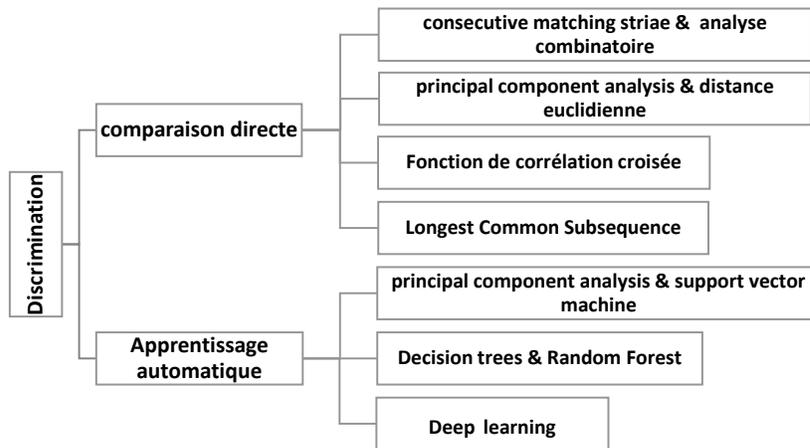
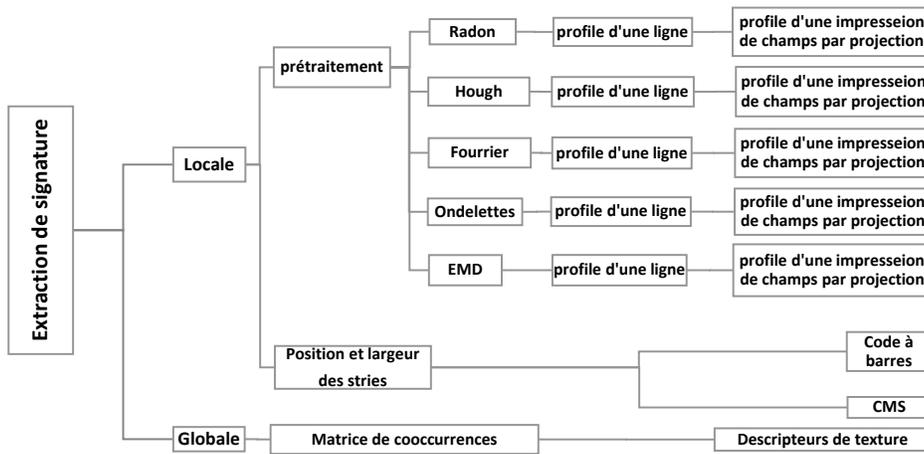
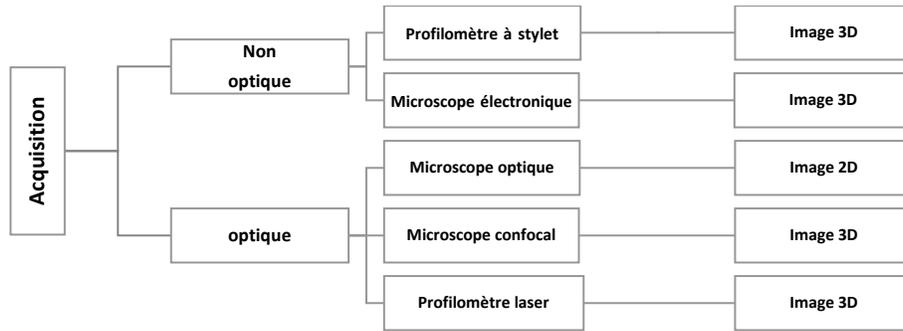


Figure 1: Techniques utilisées dans la littérature pour l'acquisition, l'extraction de caractéristique et la discrimination

Table 1: Travaux de recherches effectués dans l'automatisation de l'identification de projectiles

Études	Acquisition	Extraction_de_signatures	Discrimination	Echantillonnage	Remarque
(Gardner 1978)	Microscope électronique à balayage	Calcul de la hauteur, largeur et position des stries	Probabilité de concordance fortuite de n stries dans la comparaison entre 2 impressions de champs ou 2 impressions de rayure	13 projectiles tirés par 04 revolvers de calibre .38	
(Uchiyama 1988)	Non	Non	Oui	01 pistolet de calibre .45 Colt (5 projectiles) et un pistolet de calibre .22 Colt (2 projectiles)	La comparaison entre les stries de deux impressions de champs a été réalisée par l'analyse combinatoire et les CMS
(Pirlot et al. 1999)	Image optique 2D	Extraction des lignes par la transformée de Hough	Corrélation entre les phases de la transformée de Fourier de deux signatures	01 pistolet de calibre 9 mm (02 projectiles)	La sélection de la région d'intérêt se fait manuellement
(Tontarski and Thompson 1998)	Non	Non	Oui		
(De Kinder et al. 1998)	Profilomètre laser	Non	Non	01 pistolet de calibre 9 mm (une impression de champs)	
(De Kinder and Bonfanti 1999)	Profilomètre laser	Profil de la surface	Corrélation entre deux vecteurs (profils de surfaces)	2 pistolets de calibre 9 mm (2 x 3 projectiles)	
(Bonfanti and Ghauharali 2000)	Microscope laser confocale	Non	Non	01 pistolet de calibre 9 mm (au moins 2 projectiles)	Étude comparative entre le microscope optique comparateur et le microscope laser confocale
(Heizmann and Puente León, n.d.)	Image optique 2D résultante par la fusion de deux images (éclairages directionnel et diffusé)	Vecteur de positions des sommets et creux	Oui	6 outils (54 traces d'outils)	
(Bachrach 2002)	Microscope confocal	Vecteur de Profil de la surface	Corrélation entre deux vecteurs de profil de surfaces	3 pistolets de calibre 9 mm (2 projectiles par arme)	
(Banno, Masuda, and Ikeuchi 2004)	Microscope confocal	Topographie des impressions de champs	Calcul de distance par l'alignement automatique entre deux surfaces	01 pistolet de calibre .25 (2 projectiles) et un pistolet de calibre 7.65 mm (2 projectiles)	
(Ma et al. 2004)	Profilomètre stylus	Profil de la surface et prétraitement par filtrage passe-haut	Fonction de corrélation croisée entre deux vecteurs de profil et la distance entre ces deux vecteurs	6 pistolets de calibre 9 mm (6 projectiles réels et 40 projectiles standards fabriqués à partir des signatures de ces 6 projectiles réels)	Uniquement l'étude de répétabilité et de reproductibilité de profil de surface dans l'usinage des 40 projectiles standards
(Demoli et al. 2004)	Microscope électronique à balayage	Transformée de Fourier de l'image 2D et la conversion du résultat à un code à bar 1D	Corrélation entre deux codes à bar	3 traces d'outil laissées par 01 seule pince	
(J. Song et al. 2006)	Microscope interféromètre, Microscope confocal, Microscope confocal par balayage laser et Profilomètre stylus	Topographie de la surface	Fonction de corrélation croisée entre deux vecteurs de profil	01 projectile standard	La faisabilité d'utilisé la technique d'acquisition de topographie de surface comparaison entre les topographies de surface au lieu la comparaison optique
(Puente León 2006)	Plusieurs Images optiques 2D prises sous différents angles d'éclairage	Prétraitement par filtrage passe-bas; Fusion de plusieurs images afin de donner un contraste local maximal dans l'image finale; Filtrage passe-haut; Profil totale par la projection dans le sens des stries; L'obtention du vecteur descripteur par la suppression des structures grossières à l'aide de l'application des opérateurs morphologiques d'ouverture et de fermeture sur le profil totale	Fonction de corrélation croisée entre deux vecteurs de descripteurs	12 pistolets de calibre 9 mm (27 projectiles de test)	Une comparaison de performance a été effectuée entre le système proposé et celui d'IBIS Héritage. Une meilleure concentration de mesure (14.7%) pour le système proposé par rapport au système IBIS (27.2%)
(D. Li 2006)	Image optique 2D	Prétraitement et extraction de contour par le filtre Sobel; Transformée de Fourier de l'image 2D résultante; Vecteur descripteur composé des valeurs du maximum, la moyenne, la médiane et l'écart-type des spectres radiaux angulaires de la transformée de Fourier de l'image traitée	Non	8 pistolets de calibre 9 mm et 8 pistolets de calibre .22 LR	

Études	Acquisition	Extraction_de_signatures	Discrimination	Echantillonnage	Remarque
(Chu, Song, Vorburger, Yen, et al. 2010)	Microscope confocal	Prétraitement par filtrage de la topographie de la surface; Sélection de la zone d'intérêt ayant une somme des résiduelles carrées minimale; Calcul du profil moyen de la zone d'intérêt	Fonction de corrélation croisée entre deux vecteurs de profil moyen	12 pistolets de calibre 9 mm (48 projectiles)	
(Chu, Song, Vorburger, and Ballou 2010)	Microscope confocal	Suppression des points mal scannés et leur remplacement par interpolation; Suppression de hautes et basses fréquences par un filtre Gaussien; Suppression des structures grossières à l'aide de l'application des opérateurs morphologiques d'ouverture et de fermeture sur le profil total; Détection de contours par le filtre de Canny; Calcul de densité de stries: proportion des pixels des stries par rapport à la taille de l'image	Fonction de corrélation croisée entre deux vecteurs de profil moyen	12 pistolets de calibre 9 mm (48 projectiles)	L'étude a démontré empiriquement le lien entre la densité des stries et la discrimination entre les projectiles tirés par la même arme de ceux tirés par armes différentes
(Lin and Wen 2010)	Image optique 2D	Détection de stries par l'application du filtre de Canny et l'opérateur morphologique de fermeture; Conversion des rubans de 20 pixels de largeur à des codes à barres; Codification des codes à barres par des lettres selon la distance entre les piques	Similarité entre deux codes à barres par la méthode de la plus longue séquence commune (Longest Common Subsequence)	12 tournevis	
(Bolton-King et al. 2012)	Image optique 2D	Fusion de plusieurs images, prises à plusieurs plans, par la technique des ondelettes complexes; Binarisation de l'image résultante suivi par une réduction de sa taille au moitié; Récupération du module de la transformée de Fourier de cette image et la suppression des hautes fréquences; Transformation de l'image module à un vecteur	Analyse par composantes principales afin de réduire la dimensionnalité des vecteurs et la distance euclidienne pondérée	15 pistolets de calibre 9 mm (1 moulage par canon)	L'étude a démontré l'importance de l'exploitation des zones de transition entre les rayures et les champs d'un canon dans la discrimination entre les fabricants de canons
(Monkres et al. 2013)	Image optique 2D	Calcul manuel de la largeur et la position des stries horizontales à partir de la limite inférieure de l'impression du champ; Création d'un code à barres à partir des positions et largeurs de stries; Utilisation de la PCA pour le choix des variables principales	Modélisation des des impressions de champs par PCA et SVM	10 pistolets de calibre 9 mm (35 projectiles avec au moins 3 projectiles de chaque arme)	
(Choraś 2013)	Image optique 2D	Calcul de la matrice de coocurrences de niveaux de gris; Calcul des 4 variables du vecteur descripteur: l'homogénéité, le second moment angulaire, l'énergie et l'entropie	Distance euclidienne entre les vecteurs descripteurs	10 images	
(@ J.-F. Song 2013)	Microscope confocal	Cadrage de la topographie acquise dans une matrice de cellules carrées selon la technique appelée Contiguous Matching Cells (CMC) « entre 50 et 200 cellules par type de traces »	Pour conclure une identification il faut avoir dans la comparaison au moins 6 CMC ou deux groupes, chacun a au moins 3 CMC, vérifiant les trois paramètres d'identification, à savoir: une corrélation maximale CCF $\geq 60\%$ , les mêmes coordonnées (x, y) et les mêmes angles initiaux de recalage	10 pistolets de calibre 9 mm (40 douilles, mais pas de projectiles)	
(Stein and Chung Yu 2013)	Image optique 2D, filtres et caméra infrarouges	Non	Non	5 pistolets et 1 revolver (4 projectiles)	Aucune amélioration significative dans l'acquisition
(Jing et al. 2014)	Scanner laser couleur 3D	Transformation linéaire de l'image; Détection de contour par l'application de l'opérateur Robert; Squelettisation par l'application de l'algorithme de Hilditch; La sélection de 3 profils de contour, A, B et C	-Distance minimale entre les 3 vecteurs de profils pour deux projectiles puis la moyenne des 3 distances minimales	3 pistolets (3 projectiles par armes à feu)	
(Baiker et al. 2014)	Image 2D: Microscope optique et Topographie 3D: microscope à focus infini (Alicona)	Assemblage des 5 images afin d'obtenir l'image de l'impression de champs; Décomposition du signal en 4 composants, à savoir la microrugosité, la rugosité, l'ondulation et la forme; Prendre en considération uniquement la rugosité et l'ondulation, par l'élimination de la microrugosité (par filtre Gaussien) et de la forme (par l'élimination des profils ayant la courbe de polynômes de 2ème degré); La valeur de chaque point du profil de l'impression de champs égale à la moyenne des profils horizontaux	Corrélation croisée entre les 5 paires (profil final plus les 4 profils aux différentes échelles) pour les deux traces d'outils	50 tournevis (moulage de traces d'outils laissées par ces tournevis sous différents angles)	
(McClarín 2015)	Microscope confocal	Assemblage des 5 images afin d'obtenir l'image de l'impression de champs; Décomposition du signal en 4 composants, à savoir la microrugosité, la rugosité, l'ondulation et la forme; Prendre en considération uniquement la rugosité et l'ondulation, par l'élimination de la microrugosité (par filtre Gaussien) et de la forme (par l'élimination des profils ayant la courbe de polynômes de 2ème degré); La valeur de chaque point du profil de l'impression de champs égale à la moyenne des profils horizontaux	Fonction de corrélation croisée entre deux vecteurs de profil final	10 pistolets de calibre 9 mm leurs canons ont été rayés consécutivement. (deux projectiles par arme)	

Études	Acquisition	Extraction_de_signatures	Discrimination	Echantillonnage	Remarque
(Hare, Hofmann, and Carriquiry 2017)	Microscope confocal	-Détection des bords des impressions de champs par le lissage des profils et les positions de minimas et maximas locaux des impressions de rayures; La signature du profil est obtenue par la suppression de la courbure par l'utilisation de la régression polynomiale	Lissage des deux signatures; Identification du bon alignement par l'utilisation de la fonction de corrélation croisée; Identification des positions des pics et vallées; Application de deux techniques l'apprentissage automatique: l'arbre décisionnel et forêt aléatoire (Decision Trees ou Random Forest) sur les 7 caractéristiques trouvées dans la comparaison entre les deux signatures pour le: Calcul de CMS maximal, nombre des stries concordantes, et non concordantes, la valeur maximale de la fonction de corrélation croisée, la distance euclidienne entre les deux signatures et la somme des moyens de hauteurs des pics ou vallées	10 pistolets de calibre 9 mm leurs canons ont été rayés consécutivement	
(Bigdeli and Hamed Danandeh 2017)	Microscope optique	Détection de contour par l'opérateur de Canny; Calcul de l'angle d'inclinaison de l'impression de champs par l'utilisation de la transformée de Radon; Rotation de l'image par un angle opposé à l'angle d'inclinaison; La valeur de chaque point du profil de l'impression de champs égale à la moyenne des profils horizontaux; Décomposition du profil par la décomposition en mode empirique EMD (Empirical Mode Decomposition) en 9 niveaux; Le profilé final est formé par l'addition des 6 modes (du 3 au 8)	- Fonction de corrélation croisée entre deux vecteurs de profile final	90 fusils d'assult AK47 (2 projectiles par arme)	sensibilité de 70.49% pour les 9 meilleurs scores
(Hesar, Bigeli, and Moghaddam 2019)	Microscope optique	Détection de contour par l'opérateur de Canny - Calcul de l'angle d'inclinaison de l'impression de champs par l'utilisation de la transformée de Radon - Rotation de l'image par un angle opposé à l'angle d'inclinaison - La valeur de chaque point du profil de l'impression de champs égale à la moyenne des profils horizontaux - Décomposition du profil par la décomposition en mode empirique EMD (Empirical Mode Decomposition) en 9 niveaux - Le profilé final est formé par l'addition des 6 modes (du 3 au 8)	Fonction de corrélation circulaire croisée normalisée entre deux vecteurs de profile final	90 fusils d'assult AK47 (2 projectiles par arme)	sensibilité de 77.49% pour les 9 meilleurs scores
(Pisantanaroj et al. 2020)	Image optique 2D	deep learning	Deep learning:residual neural network (ResNet50) et densely connected convolutional network (DenseNet121), et Xception	898 projectiles tirés par 8 armes avec une augmentation de données pour obtenir 32328 aquisitions	une précision entre 91.18% et 98.41%

## 2.5 Les systèmes automatiques commerciaux existants d'identification balistique

À l'heure actuelle, le marché des systèmes automatiques d'identification balistique est partagé entre le système IBIS de la société Britano-Canadienne *Ultra Electronic Forensic Technology* et le système EVOFINDER de la société germano-russe *ScannBI*.

Plusieurs études investiguant les performances de ces deux systèmes sur des douilles ont été publiées (De Ceuster and Dujardin 2015). Cependant, il y a peu de publications qui concernent les projectiles. En effet, nous avons identifié qu'une seule évaluation pour le système IBIS (Ruprecht and Rham 2006), et trois évaluations du système EVOFINDER. La première (ScannBI 2010) a été réalisée par le *Bundeskriminalamt (BKA)* en 2010, dans le cadre d'un projet européen du 7ème programme-cadre intitulé *Odyssey*. L'étude rapporte un taux de bon classement obtenu dans les 10 premiers rangs de 86.6%. Une deuxième évaluation a été réalisée également par le BKA (Rahm 2012) sur le calibre 7.65 mm avec un taux de bon classement dans les 20 premiers rangs qui se situe entre 75% et 86%. La troisième évaluation a été faite par la police nationale chinoise (Y. Li et al. 2019), où le système EVOFINDER a été testé sur une base de données de 1000 pistolets neufs de marque Norinco QSZ-92, calibre 9 mm. Les auteurs rapportent un taux d'identification reporté de 100%. Nous émettons quelques doutes par rapport à ces dernières performances en regard des autres études publiées. Quoiqu'il en soit, bien que l'automatisation proposée par ces systèmes commerciaux soit la bienvenue dans la perspective d'aider et d'accélérer la recherche dans des bases de projectiles saisis, le travail du spécialiste, lors de la comparaison finale, reste le même et invite à une appréciation subjective des candidats projectiles retenus dans les premiers par le système automatique. Ces systèmes commerciaux n'ont en l'état pas apporté de solutions concrètes aux carences ou limites de la discipline telles qu'elles ont été identifiées précédemment.

### 3 Objectifs de la thèse

Cette thèse cherche à atteindre trois objectifs principaux:

1. Contribuer à rendre le domaine de l'examen forensique des projectiles plus objectif (c'est-à-dire de manière plus indépendante des opérateurs(-trices)) par les développements suivants:
  - la proposition d'une nouvelle définition de la signature balistique [Le soussigné a jugé que le terme "signature" est plus adapté que le terme "empreinte" communément utilisé. Le terme "signature" laisse ouvert la possibilité d'une évolution avec l'usage et dans le temps des caractéristiques (ce qui est le cas pour les canons). Le terme "empreinte" porte généralement une marque d'immuabilité comme souvent suggéré pour les empreintes digitales.
  - l'utilisation des techniques d'analyse d'images pour l'extraction de cette signature;
  - l'utilisation des techniques de l'apprentissage automatique dans la modélisation des champs et des armes, puis leur discrimination.
2. Développer un système automatique de discrimination des projectiles, pour le calibre 7.62 x 39, afin de l'exploiter pour rechercher un projectile inconnu dans une base de données et également évaluer la force d'une association potentielle avec les projectiles tirés par une arme donnée;
3. Mener une étude comparative des performances entre le système de discrimination développé dans cette recherche, le système *IBIS TRAX3D* et le système *EVOFINDER*, afin d'évaluer l'efficacité de la définition proposée de la signature balistique.

## 4 Proposition d'une nouvelle définition de la signature balistique

Comme dans toutes les traces glissées générées lors d'un mouvement parallèle entre un outil et la surface d'un objet, l'impression de champ se manifeste sous la forme des stries parallèles dans le sens du mouvement du projectile dans le canon, guidé par les deux bords du champ. Pour un canon dont les rayures sont orientées vers la droite, le bord droit et le bord gauche sont communément appelés respectivement le bord d'attaque et le bord de fuite. Inversement, pour un canon dont les rayures sont orientées vers la gauche, le bord gauche et le bord droit sont communément appelés respectivement le bord d'attaque et le bord de fuite. Dans les deux cas de figure, les stries dans l'image de l'impression de champ sont plus au moins parallèles au bord d'attaque et au bord de fuite. Nous qualifierons aussi ces stries parallèles d'"horizontales" soit dans le sens des rayures et des champs observés sur leur longueur.

Dans sa définition actuelle, la signature balistique d'une arme sur un projectile est représentée par l'ensemble des impressions de champs et de rayures du canon laissées sur la surface du projectile. Étant donné que généralement les champs laissent des traces plus prononcées et plus spécifiques que les rayures [Lomoro, 1972], les impressions de champs sont généralement jugées suffisantes pour représenter cette signature.

Selon la théorie de l'identification de l'*AFTE*, la strie est la composante élémentaire de la signature balistique et cette dernière est composée par l'ensemble des stries parallèles observées dans les différentes impressions de champs.

Lors de la comparaison, sous le microscope comparateur, entre deux projectiles, l'examineur(-trice) compare entre les impressions de champs des deux projectiles en cherchant la phase qui donne la meilleure concordance au niveau des stries parallèles.

Dans le cas d'une conclusion d'identification, l'examineur(-trice) justifie sa conclusion par des images de la comparaison en indiquant les stries claires horizontales concordantes observées. Au sens de l'*AFTE*, une impression de champs est une superposition entre un *premier plan* qui comporte l'information utile à la décision d'identification, à savoir les stries claires horizontales (caractéristiques dites individuelles), et un *arrière plan* qui englobe des données jugées non pertinentes, à savoir la texture, qui est considérée comme du *bruit de fond*.

Donc ce *premier plan* n'est rien d'autre que la signature balistique dans la définition actuelle de l'*AFTE*, à savoir les stries horizontales claires, étant donné que les stries sombres ne sont visibles que sous un éclairage opposé, elles ne sont pas prises en compte. Tandis que l'*arrière plan* représente le reste de l'image de l'impression de champs, donc de l'information jugée non pertinente selon la définition actuelle, et se manifeste sous forme de *textures*. Ce sont précisément ces textures qui vont retenir notre attention dans le cadre de cette nouvelle définition de signature balistique.

Les *textures* sont généralement composées de *textures directionnelles* et de *textures non directionnelles*. À leur tour, les *textures directionnelles* sont composées des *stries horizontales sombres* et des *textures orientées*.

De ce qui précède et dans le contexte de l'*AFTE*, il est possible de dire que:

*Impression de champ* = *Stries horizontales claires* et *Stries horizontales sombres* et *Textures orientées* et *Textures non directionnelles*

*Impression de champ* = *Signature balistique*<sub>|AFTE</sub> + *Bruit de fond*<sub>|AFTE</sub>

Où: *Signature balistique*<sub>|AFTE</sub> = *Stries horizontales claires*

*Bruit de fond*<sub>|AFTE</sub> = *Stries horizontales sombres* et *Textures orientées* et *Textures non directionnelles*



Figure 2: Des stries claires et de la texture dans une impression de champs

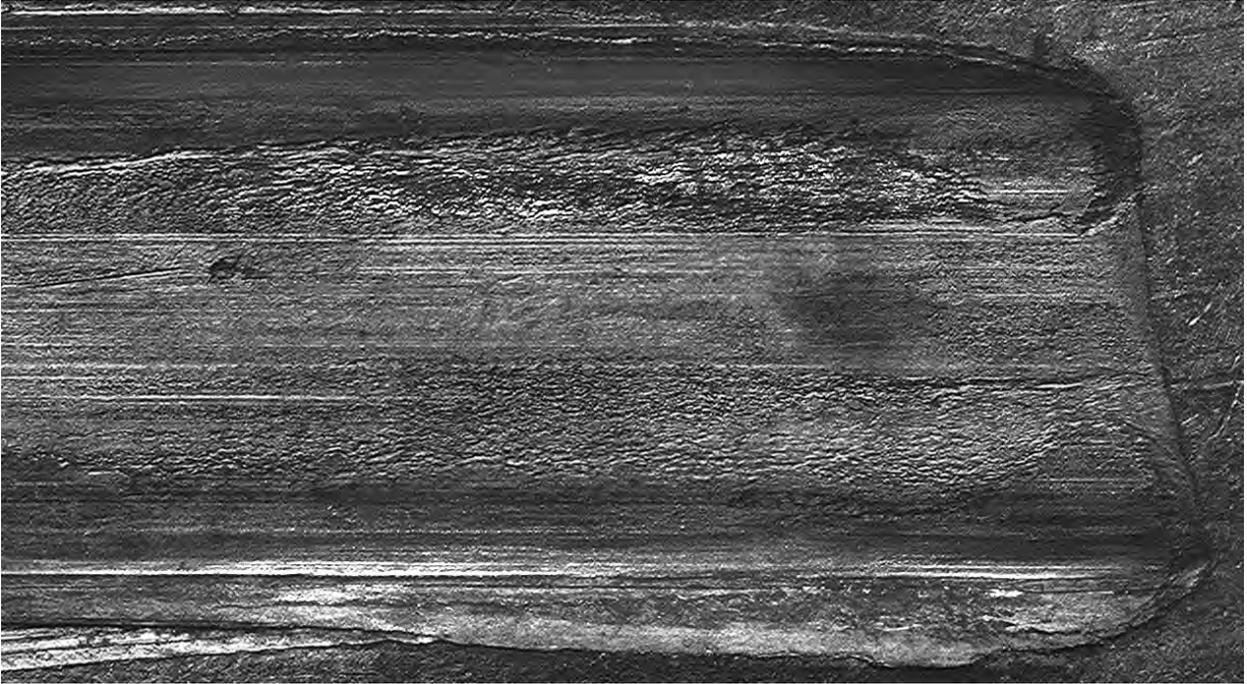


Figure 3: Stries claires mélangées avec de la texture

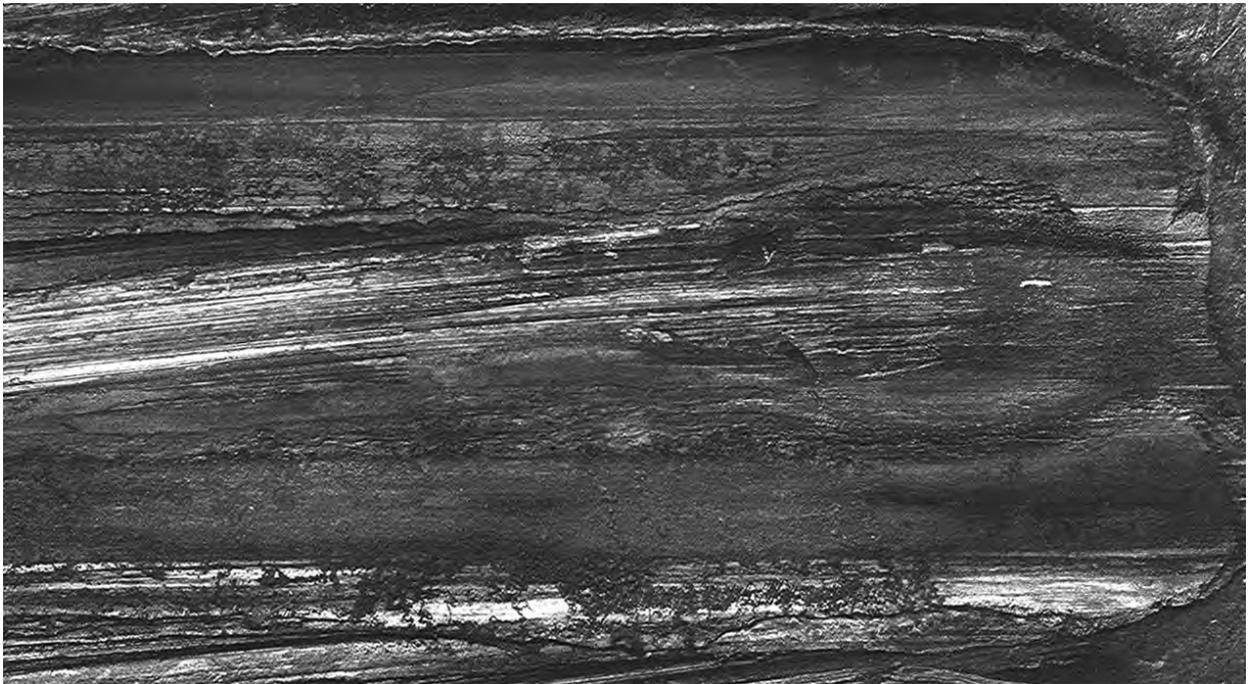


Figure 4: Stries claires et texture directionnelle

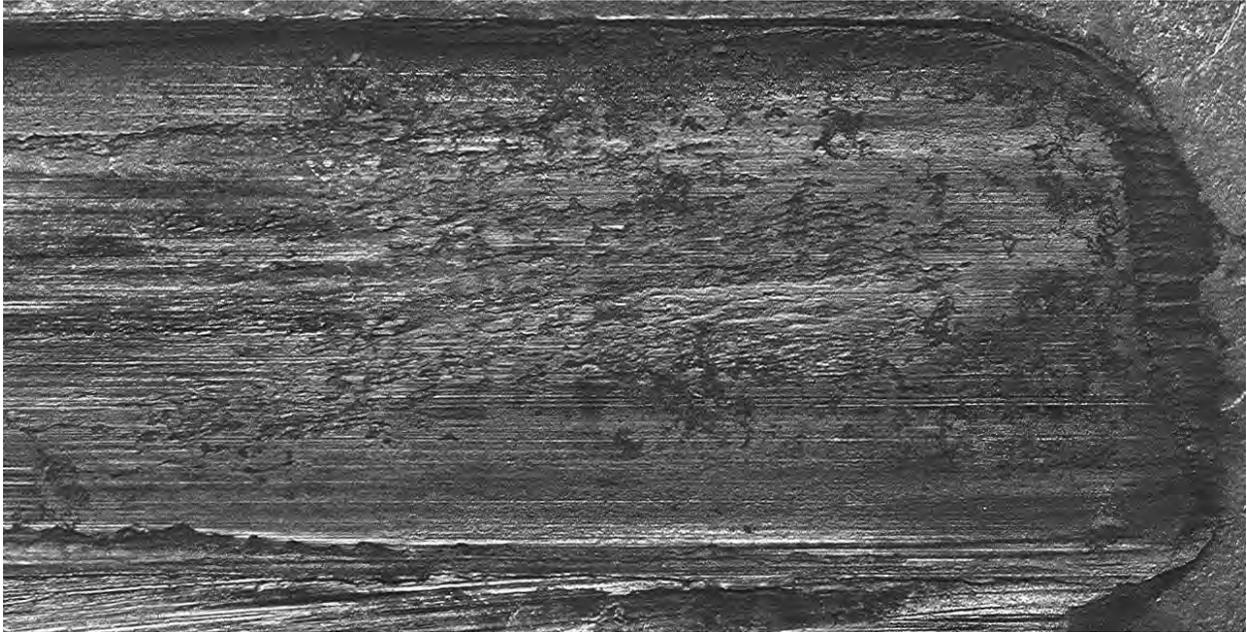


Figure 5: Stries claires noyées dans de la texture

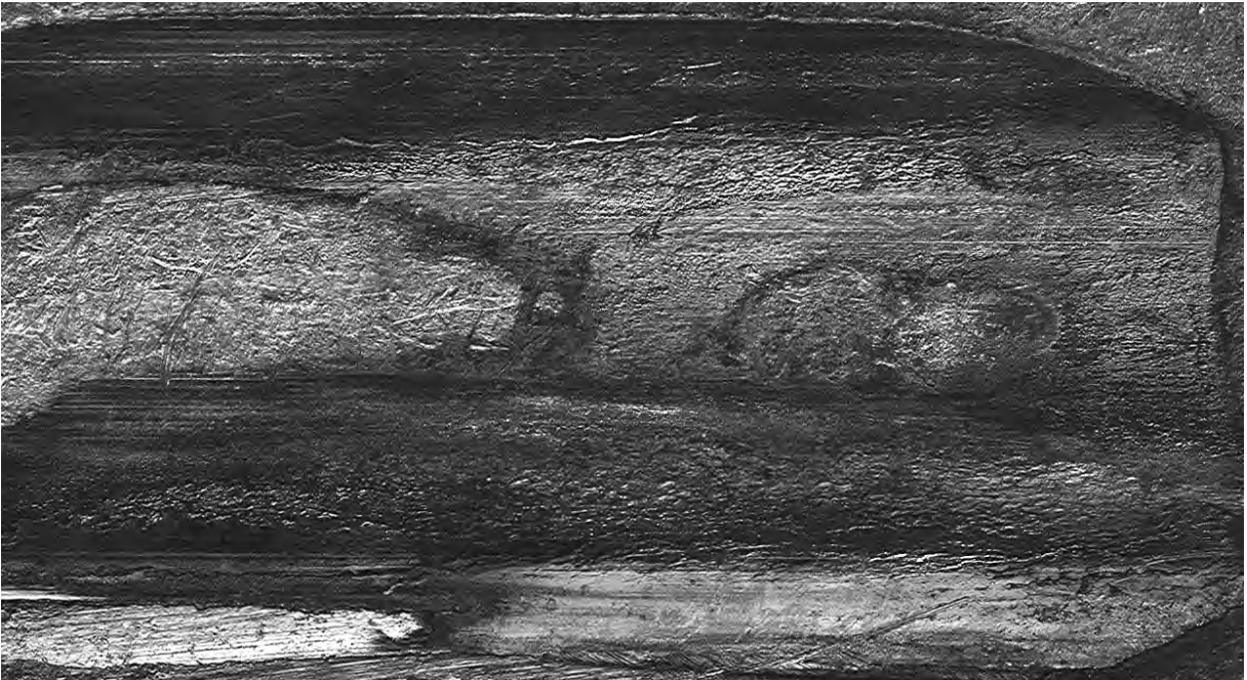


Figure 6: Omnipresence de la texture directionnelle et non directionnelles

La figure 2 est un exemple de l’omniprésence des stries sur toute l’impression de champs. La figure 3 donne un exemple où les stries sont noyées dans la texture. Les figures 4 et 5 illustrent les textures directionnelles. La figure 6 est un exemple de la dominance des textures directionnelles et non directionnelles au détriment des stries conventionnelles.

Les trois points suivants vont guider notre réflexion quant à la proposition de la définition de la signature balistique:

- Selon l’angle d’éclairage, la strie peut être sombre ou claire, car la nuance perçue d’une strie n’est pas une caractéristique intrinsèque, mais elle dépend fortement de l’intensité et de l’angle d’éclairage utilisés et elle ne reflète pas correctement la morphologie de la strie.
- Il n’y a aucun moyen technique pour vérifier, si une strie donnée, observée dans une impression de champ, a été laissée par un champ, ou par d’autres surfaces rencontrées durant la trajectoire balistique ou avant le tir.
- À une échelle d’observation donnée, les textures orientées sont dues principalement aux frottements du projectile avec d’autres surfaces (entre autres, les champs et les rayures du canon), et les textures non directionnelles représentent généralement l’état brut de la surface du projectile après son usinage.

À partir de ce constat, le soussigné propose une définition de la signature balistique d’une impression de champ, comme étant l’ensemble de stries et des textures orientées, incluses entre les deux bords de cette impression.

Donc, la signature balistique dans sa nouvelle définition est le résultat de la superposition des stries et des textures orientées laissées par le champ durant la balistique intérieure, et éventuellement des stries et des textures orientées laissées par d’autres objets rencontrés durant la balistique extérieure, la balistique terminale, ou même avant le tir. Dans cette définition, comme nous le détaillerons plus bas, il n’est pas requis de qualifier cette signature de *caractéristiques individuelles* ou de lier sa genèse aux imperfections aléatoires (par opposition aux caractéristiques de sous-classe) du canon. La signature balistique est uniquement constituée des stries et des textures directionnelles observées lors d’un examen microscopique.

Table 2: Comparaison de la définition des caractéristiques discriminantes selon la théorie de l'identification de l'AFTE et selon l'approche proposée dans ce travail

Définitions	Caractéristiques discriminantes	Arrière plan
Théorie AFTE	Stries horizontales claires	Stries horizontales sombres; Textures orientées; Textures non directionnelles
Approche proposée	Stries horizontales claires; stries horizontales sombres; Textures orientées	Textures non directionnelles

Du tableau 2, nous voulons arguer que la signature balistique selon cette nouvelle définition est plus pertinente que celle de l'AFTE. La définition de l'AFTE se contente de réduire la signature balistique (les caractéristiques dites individuelles) à l'ensemble des stries claires horizontales, sous prétexte que la signature du champ peut être représentée seulement par le groupe des stries claires horizontales, et que ces dernières sont dues uniquement au contact entre le champ et le projectile. Ces deux arguments ne sont pas forcément corrects ou vérifiés. Par contre, selon la nouvelle définition proposée, la signature balistique est mieux spécifiée, car elle regroupe les stries horizontales, sombres et claires, et les textures orientées (les textures directionnelles) qui sont plus invariantes par rapport à l'éclairage que les stries horizontales claires ou foncées. Il n'est pas possible de distinguer dans l'impression de champ, les textures directionnelles issues du contact entre le projectile et le champ, de celles issues du contact entre le projectile avec d'autres objets. Donc, quelle que soit la technique utilisée, optique ou non optique, il n'est pas possible, à partir d'une seule acquisition, de discerner la signature balistique d'un champ, à savoir les stries et les textures orientées, des celles laissées par d'autres objets. Afin de réaliser cette distinction, le recours à l'apprentissage, humain ou automatique, est considéré comme l'une des meilleures solutions. Cette solution sera détaillée ultérieurement.

## 5 L'approche proposée pour la discrimination balistique et l'évaluation

Comme cité supra, l'approche la plus ancienne et la plus utilisée dans l'identification est celle adoptée par l'*AFTE* publiée en 1992, mais utilisée bien avant cette date. Dans cette approche, le seul critère utilisé dans l'identification ou l'exclusion est le degré de compatibilité, au niveau des caractéristiques dites individuelles, observé dans la comparaison entre les éléments de munition. Dans le cas des projectiles, cette compatibilité est observée au niveau des stries horizontales claires concordantes. Afin de conclure à une identification entre deux projectiles, outre la compatibilité au niveau de toutes les caractéristiques de classe, le degré de compatibilité, sous-entendu les concordances entre les stries horizontales claires, doit satisfaire, toujours selon l'*AFTE*, les deux conditions suivantes:

- Il doit être supérieur au meilleur degré de compatibilité observé, au niveau des caractéristiques dites individuelles, dans la comparaison entre des projectiles tirés par des armes différentes;
- Il doit être cohérent avec la compatibilité observée, au niveau des caractéristiques dites individuelles, lors des comparaisons entre des projectiles tirés par la même arme.

Du point de vue du soussigné, ces deux conditions sont les causes principales de la vulnérabilité de la discipline et c'est dans celles-ci que réside toute la subjectivité du domaine. En effet, dans le cas des projectiles, il est facile de formuler les objections suivantes:

- Il n'y a pas une définition précise pour mesurer le *degré de compatibilité*, donc, de la concordance au niveau des stries horizontales claires. Est-ce que c'est le pourcentage des stries concordantes par rapport au nombre total des stries, ou est-ce le nombre des stries concordantes?
- Pour le même examinateur, au cours de son expérience professionnelle, le meilleur degré de compatibilité observé, au niveau des caractéristiques dites individuelles dans la comparaison entre les projectiles tirés par des armes différentes, change et s'accroît. De ce fait, cette appréciation est variable dans le temps pour le même examinateur et il est différent d'un examinateur à l'autre, ce qui rend le critère quasiment inutilisable par la communauté des spécialistes;
- Il en va de même pour la deuxième condition, car le degré de compatibilité observé, au niveau des caractéristiques dites individuelles, dans la comparaison entre les projectiles tirés par la même arme, évolue avec l'expérience professionnelle du même examinateur, et varie d'un examinateur à l'autre;
- D'après ces deux conditions, il est sous-entendu implicitement que le degré de compatibilité, observé dans la comparaison entre les projectiles tirés par la même arme est toujours supérieur à celui observé entre les projectiles tirés par des armes différentes. Cependant, il n'existe aucun argument logique ou des études statistiques pouvant justifier cette prémisse. Il est tout à fait possible de trouver un degré de concordance, soit en pourcentage ou en nombre, de stries dans la comparaison entre deux projectiles tirés par des armes différentes, supérieur à celui issu de la comparaison entre deux projectiles tirés par la même arme. Il en va de même pour les impressions de champs. Il est également possible de trouver un degré de concordance, soit en pourcentage ou en nombre, dans la comparaison entre les impressions de deux champs, supérieur à celui issu de la comparaison entre deux impressions du même champ.

En réalité, le calcul du degré de compatibilité entre les projectiles tirés par des armes différentes ou par les mêmes armes n'a jamais été fait. Pour cette raison, et afin de conclure une identification, l'examinateur n'utilise guère ces deux conditions, mais il se base uniquement sur sa formation et son expérience dans la matière. Le progrès ne peut venir que d'une approche où une mesure effective du degré de compatibilité est faite, sans laisser la chose uniquement à l'appréciation de l'examinateur(-trice).

## Manque dans la définition de la ou des stries:

- Pour les traces striées ou glissées, la théorie de l'identification adoptée par l'*AFTE* (AFTE Criteria for Identification Committee 1992) a défini la strie comme le seul descripteur des caractéristiques dites individuelles laissées sur un projectile. Cette strie est définie comme étant une variation dans le contour.<sup>27</sup> Cette définition est relativement vague, car elle fait appel à un terme *le contour* qui n'a pas une définition précise, d'autant plus que le contour est utilisé plutôt pour caractériser les traces moulées, pour délimiter des régions bien précises telles que les traces du percuteur, de l'éjecteur ou de la tête de culasse, et pas dans les traces glissées, où l'aspect de région est absent, et qui est remplacé par la texture.
- Ce manque de précision dans la définition de la strie a permis à la subjectivité d'occuper une place prépondérante dans l'expertise balistique. Il y a une différence entre la réalité d'une strie comme étant un arrangement connexe de crêtes, réparties dans une direction, et son aspect visuel qui apparaît comme une forme rectiligne brillante ou sombre selon le type et l'angle d'éclairage et le grossissement utilisés.

De ce qui précède, et dans l'optique de la définition proposée de la signature balistique, il est judicieux de postuler une nouvelle approche pour la discrimination des projectiles. Elle est résumée ci-après.

1. Les caractéristiques de classe mesurées sur un projectile sont, le nombre et l'orientation des impressions de champs et de leurs largeurs.
2. Les caractéristiques microscopiques révélées sur un projectile sont l'ensemble des textures directionnelles réparties sur les impressions de champs et éventuellement sur les impressions de rayures.
3. Pour dire qu'une arme saisie, parmi toutes les armes référencées dans une base de données, est la plus probable d'avoir tiré un projectile, il faut satisfaire les deux conditions suivantes:
  - Une compatibilité de l'ensemble des caractéristiques de classe;
  - Le degré de compatibilité mesuré dans la comparaison des caractéristiques microscopiques entre ce projectile et les projectiles de test de cette arme, doit être supérieur à tous les degrés de compatibilité mesurés lors la comparaison des caractéristiques microscopiques entre ce projectile et les projectiles obtenus des armes saisies dans une base de données, tout en étant au même niveau que la compatibilité dans la comparaison des caractéristiques microscopiques entre les projectiles de référence de l'arme saisie. Ce critère qui est mesurable doit donc satisfaire à l'équation suivante:

$$LR(\text{bullet vs suspected firearm}) = \text{Max}[LR(\text{bullet vs DB})]$$

4. Pour dire que deux projectiles sont potentiellement tirés par la même arme inconnue (ici donc dans une comparaison trace-trace), il faut satisfaire les deux suivantes conditions:
  - Une compatibilité de l'ensemble des caractéristiques de classe;
  - Le degré de compatibilité mesuré dans la comparaison des caractéristiques microscopiques entre les deux projectiles doit être supérieur à tous les degrés de compatibilité obtenus des comparaisons des caractéristiques microscopiques entre chacun des deux projectiles avec les projectiles de référence des autres armes saisies dans la base de données (figure 7). Il s'agit donc de satisfaire à l'inégalité suivante:

---

<sup>27</sup>En anglais: « *Striation: Contour variations, generally microscopic, on the surface of an object caused by a combination of force and motion where the motion is approximately parallel to the plane being marked* »

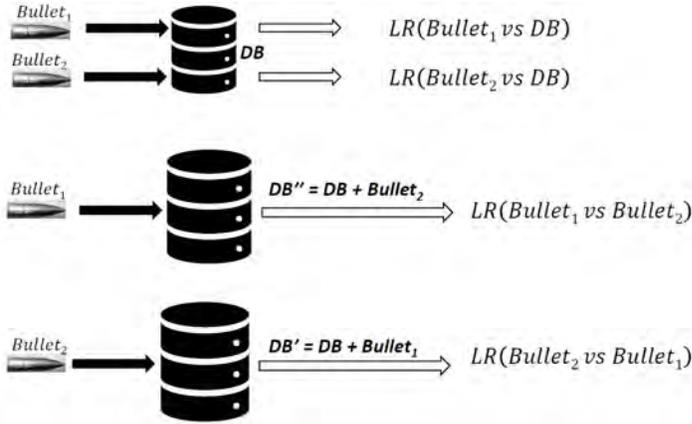


Figure 7: Schéma de discrimination pour le cas projectile-projectile

$$\text{Min}[LR(\text{bullet}_1 \text{ vs } \text{bullet}_2)|_{DB''}, LR(\text{bullet}_2 \text{ vs } \text{bullet}_1)|_{DB'}] \geq \text{Max}[LR(\text{bullet}_1 \text{ vs } DB), LR(\text{bullet}_2 \text{ vs } DB)]$$

Le terme *dire* utilisé dans cette approche reflète qu'une discrimination est une décision obtenue selon la théorie de la décision (Biedermann, Bozza, and Taroni 2008). La discrimination sera décidée sur la base du rapport entre l'impact d'une fausse identification et d'une fausse exclusion, les bénéfices d'une décision correcte, les chances a priori en référence à la taille de la base de données, et le rapport de vraisemblance obtenu par chacune des comparaisons effectuées (Biedermann, Bozza, and Taroni 2016).

L'avantage de cette nouvelle approche de discrimination est qu'elle est plus réaliste que la théorie d'identification de l'*AFTE*, notamment en raison des avantages suivants:

- Elle utilise des descripteurs des caractéristiques microscopiques (les textures directionnelles) plus représentatifs de la signature balistique que celui utilisé par la théorie de l'*AFTE* (les stries claires horizontales).
- Au lieu de conclure de manière catégorique (ou en invoquant l'impossibilité pratique d'une erreur) en regard de toutes les armes potentielles en circulation dans le monde, l'approche proposée exprime la force du lien entre l'arme issue de la base de données et le projectile en question sous la forme d'un rapport de vraisemblance, et ceci après avoir comparé objectivement ce projectile avec toutes les armes potentielles saisies dans la base de données. Le choix de l'approche basée sur le *LR*, au lieu de l'approche déterministe qui sous-tend à la théorie de l'*AFTE*, est dicté par la nature de la signature balistique (textures directionnelles), car cette dernière varie continuellement pour la même arme en fonction de son usage et du temps.
- Le taux d'erreur d'une discrimination peut être mesuré par la proportion des faux positifs observés dans la comparaison entre les tirs de test des différentes armes saisies dans la base de données. Par analogie, le taux d'erreur associé aux exclusions peut être mesuré par le pourcentage de faux négatifs observés dans les comparaisons effectuées entre les projectiles tirés par les mêmes armes.

Dans une affaire impliquant l'utilisation d'une arme à feu, il existe généralement au moins une arme suspectée d'avoir tiré un élément de munition (douille ou projectile) récupéré des lieux. Les enquêteurs veulent vérifier, par le biais d'un examen balistique, si l'arme suspecte est à l'origine des traces observées sur l'élément de munition, et il est très rare, de présenter devant un tribunal un élément de munition sans la présence d'au moins une arme de référence. Donc, lorsqu'on conclut à une identification (ou à une exclusion) entre deux éléments de munition, il est sous-entendu de confirmer (ou d'infirmer) qu'une arme d'intérêt a tiré l'élément. Il est important préciser que dans le cadre de ce travail de recherche, le rapport de vraisemblance (*Likelihood Ratio* ou *LR*) est utilisé dans les deux modes, investigatif et évaluatif. En mode investigatif, il est utilisé pour classer les armes potentielles, où l'analyste va communiquer ce classement. Dans le mode évaluatif, le

LR est utilisé principalement pour exprimer la force à attribuer à la comparaison (donc le degré par lequel les observations favorise la proposition de l'identité de source ou pas) sans toutefois donner des décisions sur cette proposition. A noter toutefois que si le système juridique d'un pays invite l'analyste à se prononcer sur une individualisation, l'analyste peut le faire (avec une prudente transparence) en appliquant la théorie de la décision selon (Biedermann, Bozza, and Taroni 2008) et (Biedermann, Bozza, and Taroni 2016).

L'intérêt de l'approche proposée plus haut par rapport à la théorie d'identification de l'*AFTE*, réside dans le fait que nous remplaçons deux conditions inatteignables de la théorie de l'*AFTE* par deux conditions basées sur des données empiriques, mesurables, indépendantes de l'examineur(-trice), plus pertinentes et applicables. Sa contrainte par contre est double: D'un côté, il est nécessaire de disposer d'une capacité d'extraire la signature balistique et de les comparer automatiquement entre elles. C'est précisément l'objet du prochain chapitre. De l'autre, les performances du système sont dépendantes des données qui vont venir alimenter la base de données. En d'autres termes, les seules mesures qui viendront guider à l'appréciation de la force d'une association entre un projectile et une arme de question sont celles issues des transactions effectuées sur les données en présence.

## 6 Développement de l'algorithme pour l'extraction de la signature balistique

### 6.1 Équipements et protocole d'acquisition

Un microscope comparateur *Leica FSC* muni d'une caméra monochrome de type *DFC290 HD*, avec un éclairage par fibre optique incliné de  $20^\circ$  approximativement, ont été utilisés pour l'acquisition des impressions de champs de chaque projectile (figure 8) avec un grossissement de x40. Le choix de l'imagerie optique 2D a été dicté par le fait qu'elle était la seule technique à disposition du soussigné au niveau du département balistique de l'Institut National de Criminologie et de Criminologie de la Gendarmerie Nationale algérienne (INCC/GN).

Afin de standardiser l'acquisition des impressions de champs, le protocole suivant a été adopté:

- Le projectile est monté sur le support de fixation;
- Le projectile est tourné sur son axe afin d'assurer la perpendicularité de l'impression de champs avec l'axe de l'objectif;
- Le support de projectile est placé dans le plan horizontal, afin de superposer la limite supérieure de l'impression de champ (le bord d'attaque) avec la limite supérieure du cadre à photographier;
- Le projectile est tourné sur son axe afin d'assurer la perpendicularité de la ligne médiane de l'impression de champ avec l'axe optique de l'objectif;
- La base de l'impression de champ est superposée avec le cercle d'observation de binoculaire du microscope comparateur;
- La fenêtre de l'exposition de la lumière est élargie pour couvrir la totalité de la zone d'acquisition afin de minimiser la surexposition et la sous-exposition;
- L'image est acquise puis enregistrée au format *TIFF* sans compression. Le nom du fichier est sous la forme  $x\_ByLz$ , où  $x$  correspond au numéro de l'arme, et prend les valeurs de 1 à 200,  $y$  correspond au numéro de projectile de référence, et qui prend les valeurs de 1 à 6, et  $z$  correspond au numéro de l'impression de champ, et qui prend les valeurs de 1 à 4. Par exemple : *123\_B4L3* est le nom de l'image de la troisième impression de champ du quatrième projectile tiré par l'arme numéro 123.

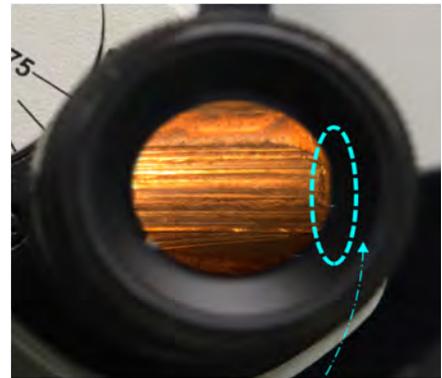
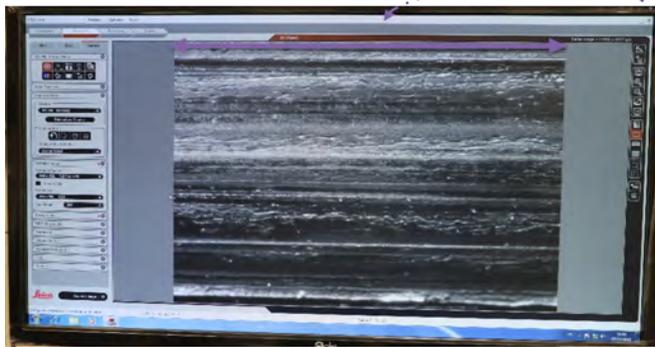


Figure 8: Protocole d'acquisition des impressions de champs utilisé

## 6.2 Extraction de la signature balistique

Le but de cette recherche est le développement d'un système automatique de discrimination des projectiles. La nouvelle définition de la signature balistique stipule que le descripteur des caractéristiques laissées par un canon est l'ensemble des textures directionnelles réparties sur les impressions de champs, et que les textures non directionnelles sont considérées comme du bruit. Il est donc judicieux de mettre en œuvre un algorithme adapté pour l'extraction automatique des textures directionnelles par l'élimination des textures non directionnelles.

Afin de réaliser l'extraction des textures directionnelles, une chaîne de traitement automatique, composée de plusieurs opérations et transformations, a été adoptée. La figure 21 présente les différentes étapes du traitement automatique.

L'entrée de cette chaîne est une image optique 2D, en niveau de gris, de l'impression de champs. Chaque impression de champ d'un projectile acquise est modélisée de manière indépendante. Cette image est de taille de 3 mégas pixels (2048 x 1536), en 8 bits.

Afin d'éliminer les formes verticales, car a priori elles ne proviennent pas du frottement entre le projectile et le champ du canon, une décomposition en cinq niveaux par transformée par ondelettes 2D est appliquée sur l'image originale.

Chaque étape du processus est détaillée les figures suivantes:

La figure 9 présente une image d'une impression de champ non traitée. La figure 10 présente l'image de la texture non directionnelle obtenue après la reconstruction par l'utilisation des composantes verticales issues de la décomposition par ondelettes de *Haar*, de l'image originale. Les fonctions développées par (Gonzalez, Woods, and Eddins 2003) ont été utilisées dans ces phases de décomposition et de reconstruction. La figure 11 montre l'image de la texture directionnelle obtenue de la reconstitution à partir des composantes horizontales et diagonales obtenues de la décomposition par ondelettes de *Haar* de l'image originale. La figure 12 représente l'image complémentaire de l'image de la texture directionnelle.

Dans le but de vérifier qu'une ligne appartient à une texture, un filtrage par la transformée par ondelettes de *Haar* est appliqué sur cette ligne afin d'éliminer les coefficients du troisième niveau. La figure 13 illustre un exemple de ce traitement, où la courbe rouge représente le signal initial et la courbe mauve représente le résultat du filtrage.

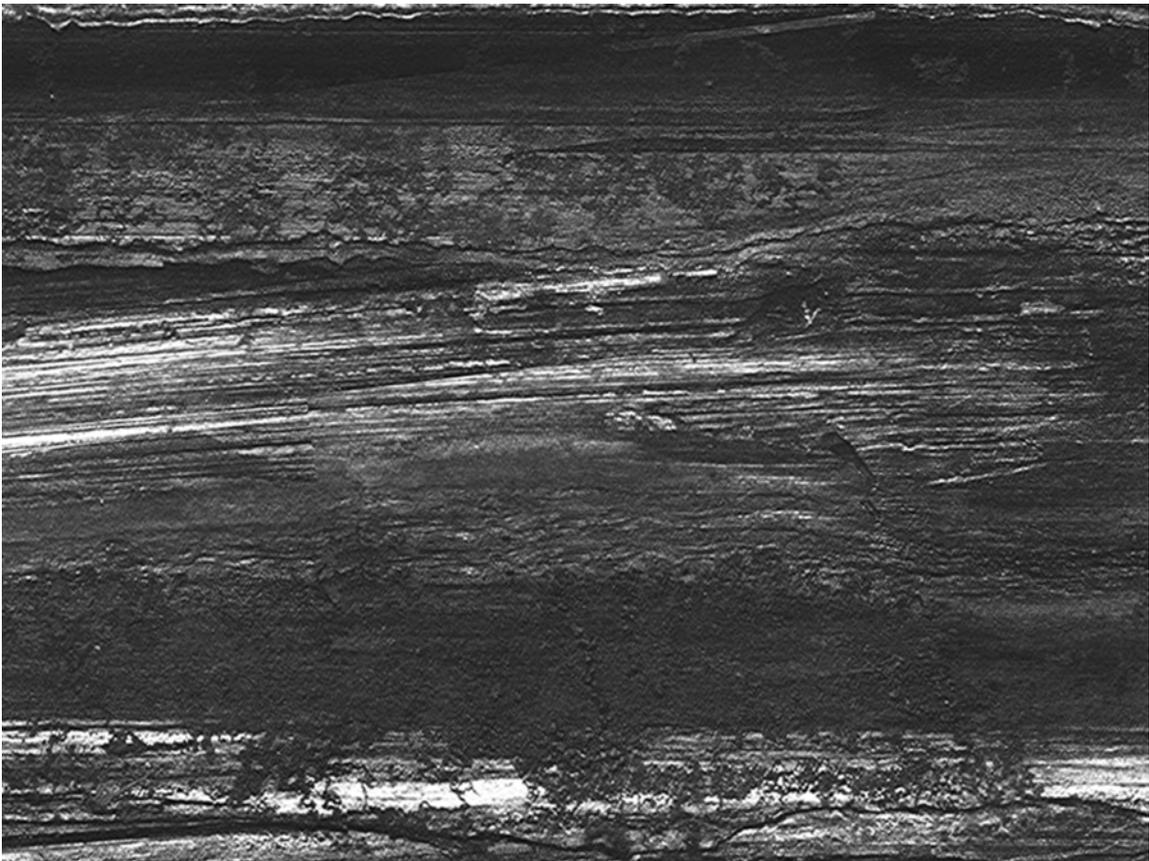


Figure 9: Image originale d'une impression de champs

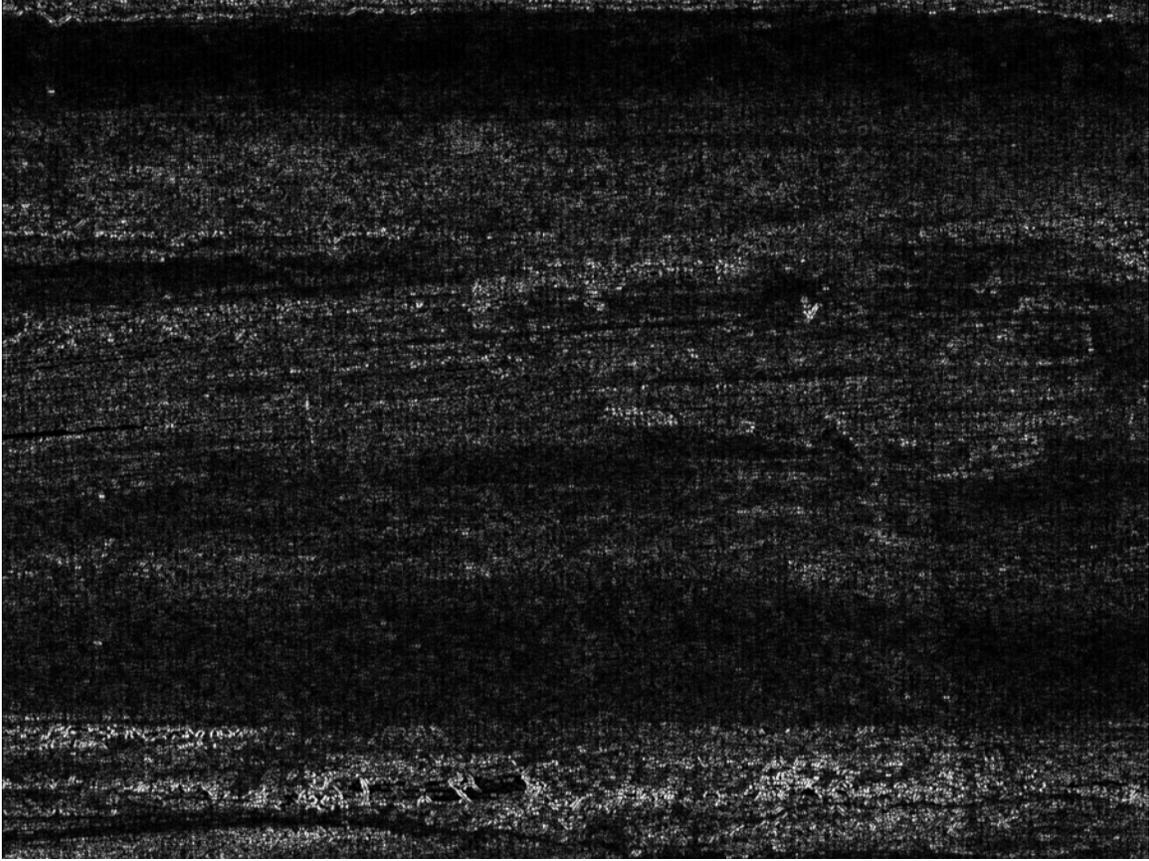


Figure 10: Texture non directionnelle de l'image originale

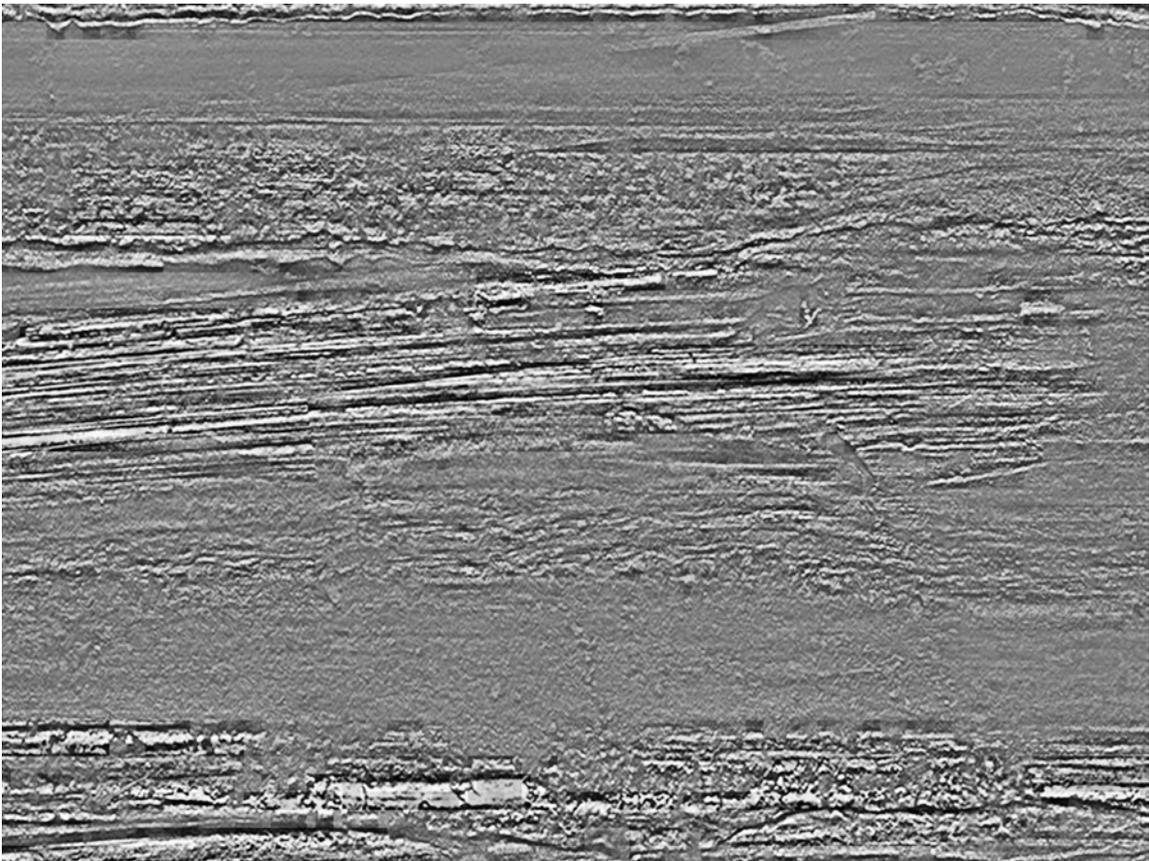


Figure 11: Texture directionnelle de l'image originale

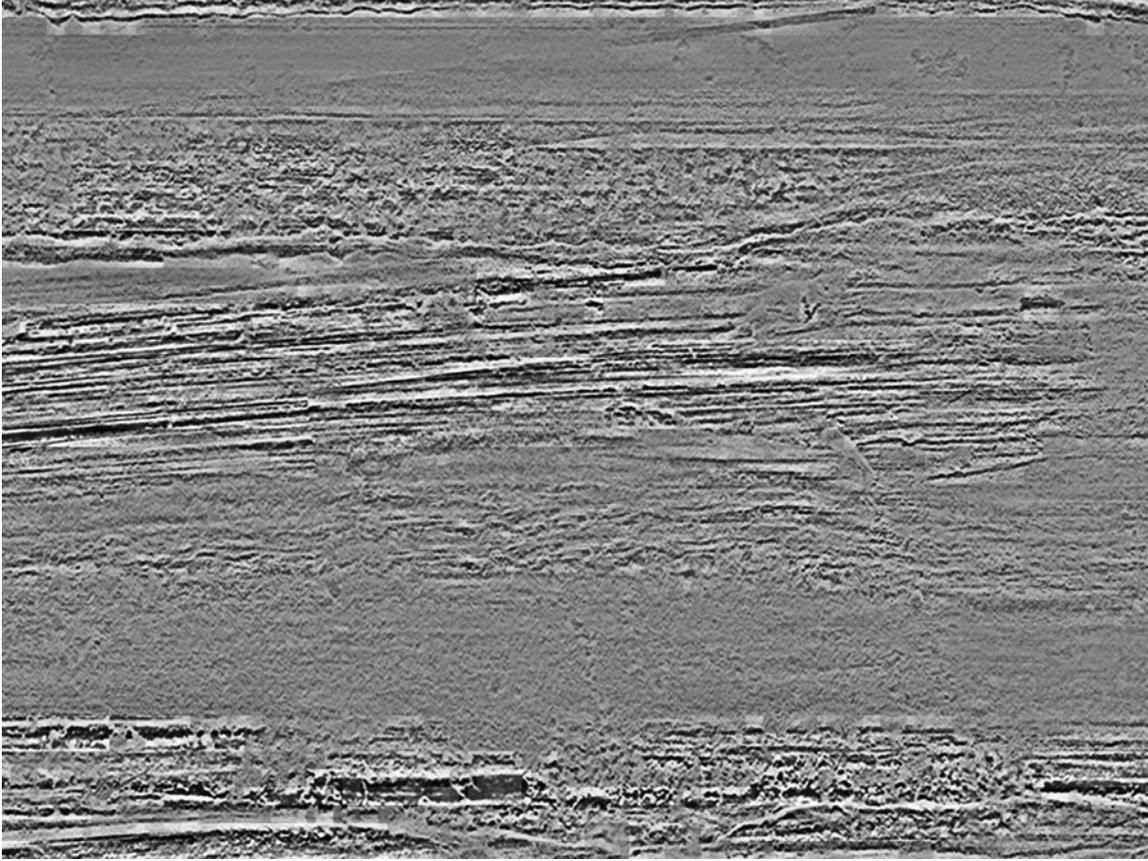


Figure 12: Image complémentaire de la texture directionnelle

Pour qu'une ligne appartienne à une texture, elle doit vérifier deux conditions empiriques, fixées par essai et erreur par le soussigné: un niveau de gris moyen supérieur à 0.25 et un écart-type inférieur à 0.20. Il est admis a priori que le changement de l'instrument de capture (avec la même résolution de 3 M pixels) ne va pas influencer significativement les performances de la solution développée. Si la ligne satisfait ces deux conditions, elle va être remplacée par un pixel ayant la valeur moyenne de 32, sinon elle va être remplacée par un pixel noir. De ce fait, chaque bande va être remplacé par un vecteur de 1356 pixels et l'image de la texture directionnelle sera représentée par une image compressée de la texture directionnelle d'une taille de 64 x 1536 pixels. La figure 14 illustre les étapes utilisées pour le passage de l'image de la texture directionnelle vers l'image compressée de la texture. L'image complémentaire de la texture directionnelle sert à détecter les textures directionnelles sombres non prises en considération lors du traitement de l'image de la texture directionnelle.

Les figures 15 et 16 représentent respectivement la texture directionnelle et son image compressée ainsi que le complément de la texture directionnell.

Grace à la méthode de l'extraction de la texture directionnelle et de sa compression, il est possible de comparer visuellement plusieurs impressions de champs à la fois au lieu de comparer que deux impression de champs comme est le cas sous le microscope comparateur. La figure 18 illustre les textures directionnelles de quatre impressions de champs issues de vingt-cinq projectiles tirés consécutivement par la même AKM47 où il est possible de en même temps 100 impressions de champs, et de constater la régularité de la texture directionnelle au sein des photos issues de la même impression de champs, chose qui est difficile à la réaliser avec la plupart des logiciels actuels de traitement d'image.

La caractérisation par l'utilisation de l'histogramme de gradient orienté (en anglais: *histogram of oriented gradients* ou *HOG*) constitue la dernière étape dans l'algorithme d'extraction de la signature balistique. Cet opérateur (Dalal and Triggs 2005) est appliqué séparément sur l'image compressée de la texture directionnelle

et celle du complément de la texture directionnelle. Les figures 19 et 20 présentent les étapes utilisées dans l'extraction des caractéristiques *HOG* ainsi qu'un exemple de la distribution de ces caractéristiques pour une image de la crosse pliante d'un AKM 47.

La fonction *extractHOGFeatures* de **Computer Vision Toolbox** du logiciel *Matlab* a été choisie pour l'extraction de caractéristiques *HOG*. Cette fonction accepte en entrée l'image en question et la taille de la cellule de balayage. Une cellule de taille de 24 x 16 pixels a été appliquée sur l'image compressée de la texture directionnelle pour donner un vecteur  $V_1$  de 6804 variables. Une cellule de taille de 48 x 24 pixels a été appliquée sur l'image compressée du complémentaire de la texture directionnelle pour donner un vecteur  $V_2$  de 1116 variables. La concaténation de  $V_1$  et  $V_2$  donne le vecteur descripteur  $V$  de l'impression de champ, avec au total 7920 variables.

La figure 21 récapitule les différentes étapes utilisées dans l'extraction de la signature balistique.

Dans les dix études de recherche sur l'automatisation de l'identification automatique, citées dans le tableau 1, la signature balistique de l'impression de champ est représentée par la projection horizontale des profils de surface, sous prétexte que les caractéristiques dites individuelles, à savoir les stries, sont parfaitement horizontales. Mais, même en admettant que les stries soient parfaitement horizontales, il est fort probable qu'il existe plusieurs stries ayant des hauteurs différentes, ou des intensités différentes et avec des largeurs différentes, ce qui rend la projection horizontale peu utile, car l'information sur les distributions locales et régionales des stries sera perdue. Cependant, les stries ne sont pas nécessairement parallèles avec l'orientation du champ et il est rare d'observer une strie qui occupe tout le long de l'impression de champ. Du point de vue du soussigné, la signature balistique d'une impression de champ doit refléter la distribution locale et régionale des caractéristiques, à savoir les textures directionnelles.

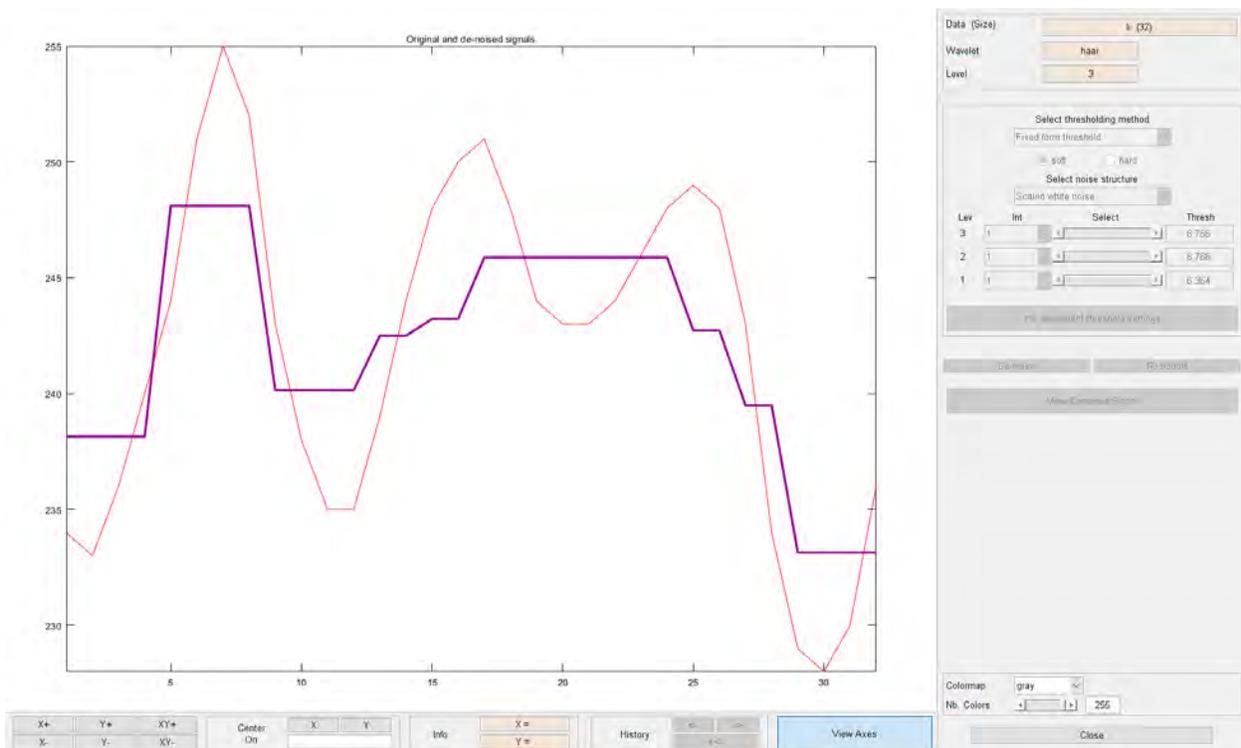


Figure 13: Filtrage d'un signal de 32 pixels

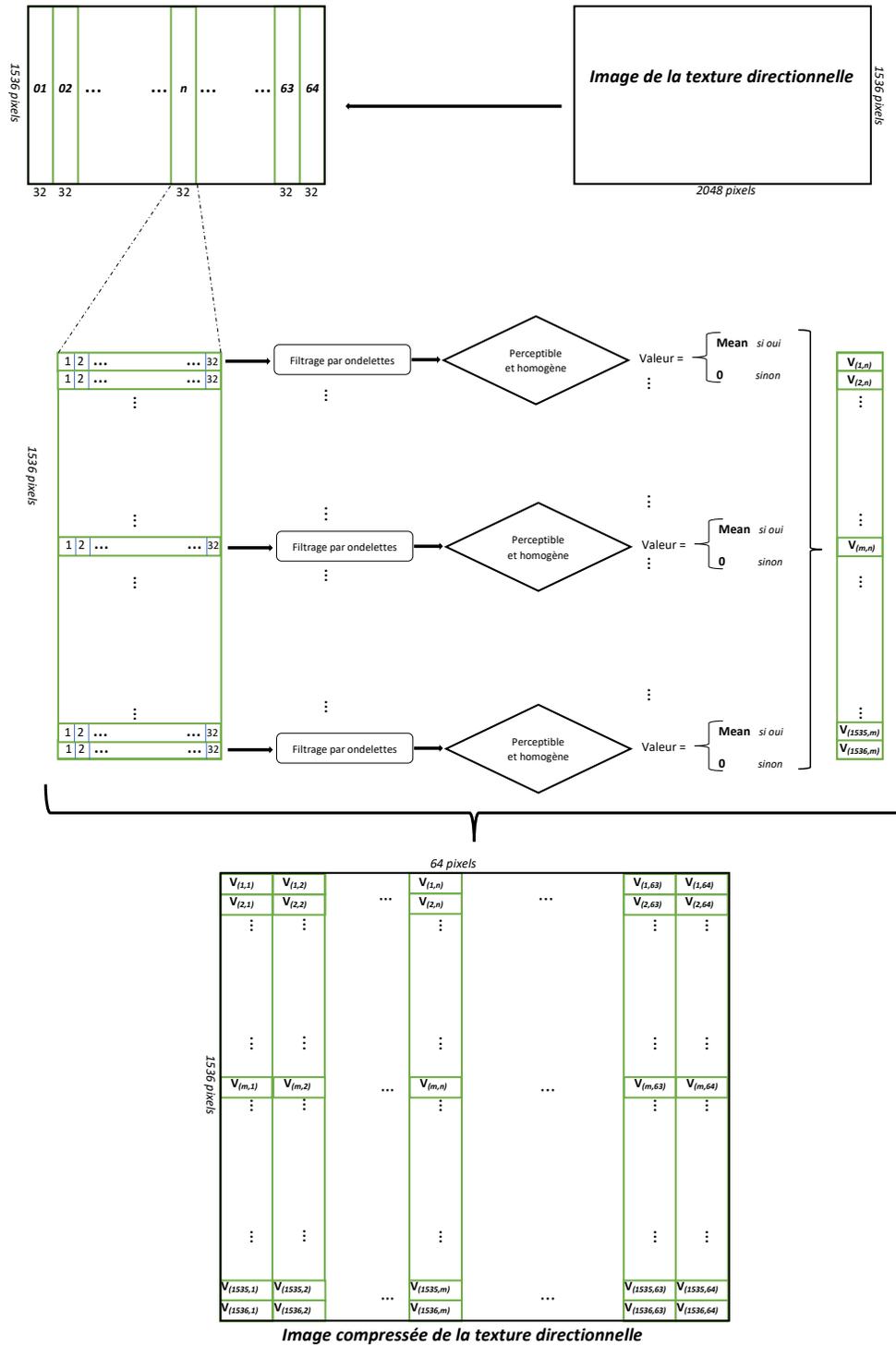


Figure 14: Processus de compression de l'image de texture directionnelle

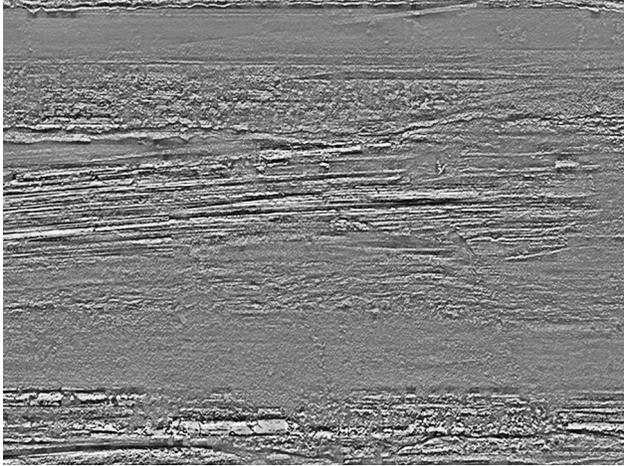


Figure 15: Texture directionnelle et son image compressée

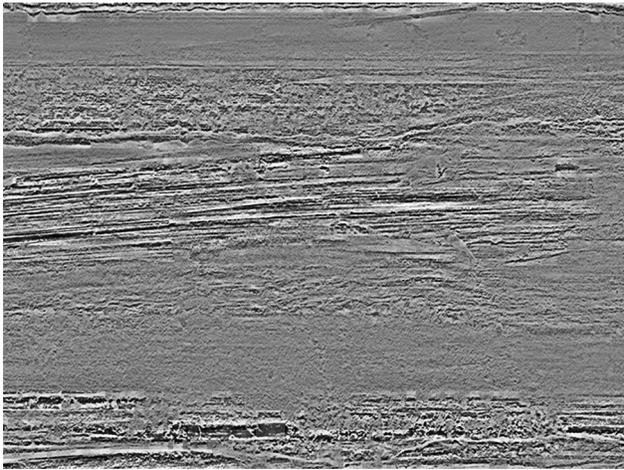
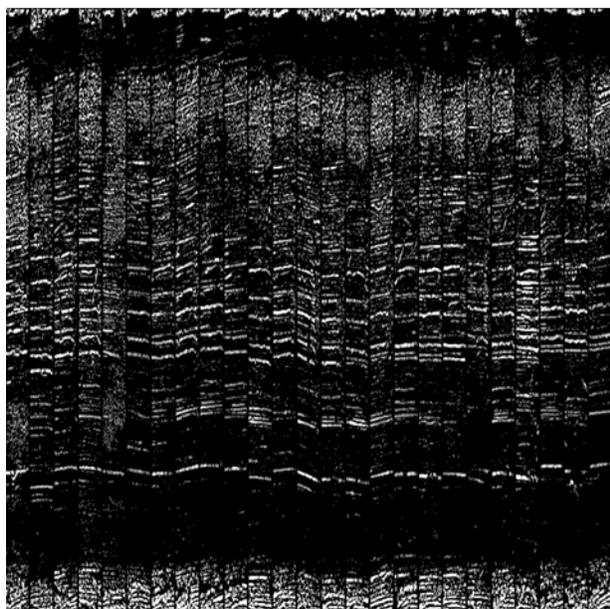


Figure 16: Complement de la texture directionnelle et son image compressée

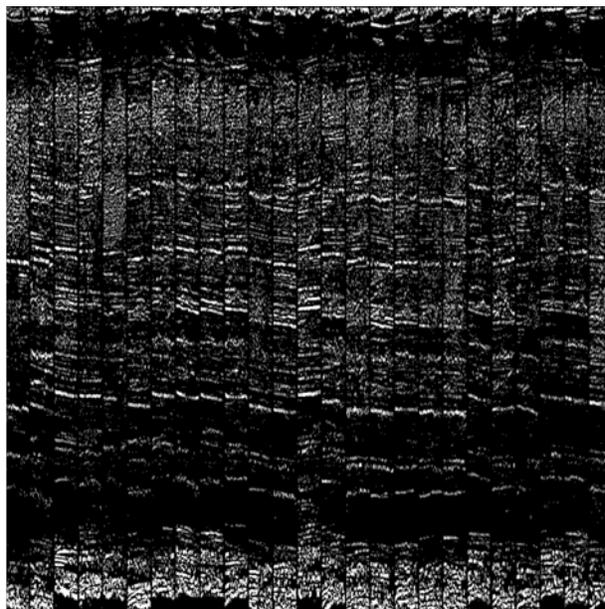


Figure 17: Image compressée de la texture directionnelle

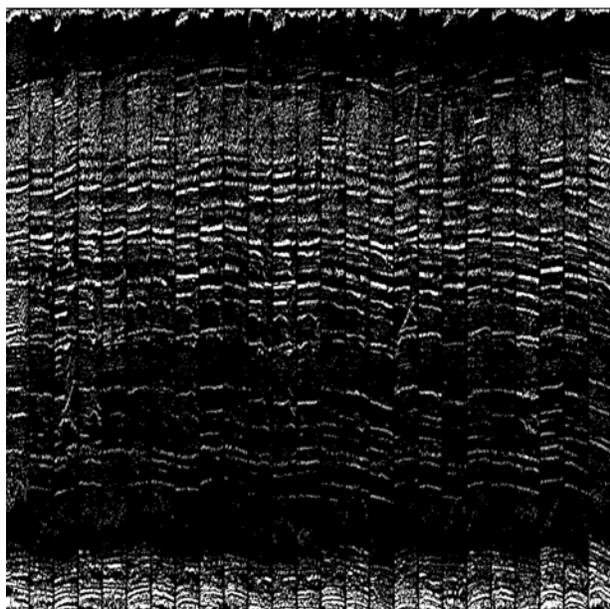
**Land impression n°1**



**Land impression n°2**



**Land impression n°3**



**Land impression n°4**

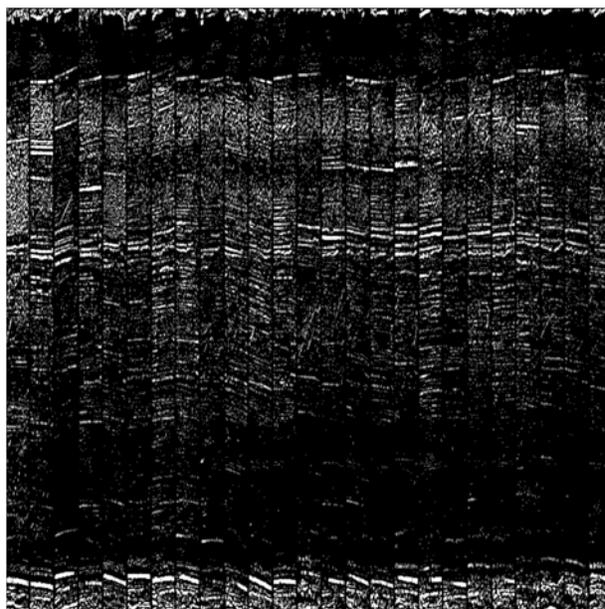


Figure 18: Textures directionnelles compressées des 4 impressions de champs de 25 projectiles tirés consécutivement par la même AKM 47

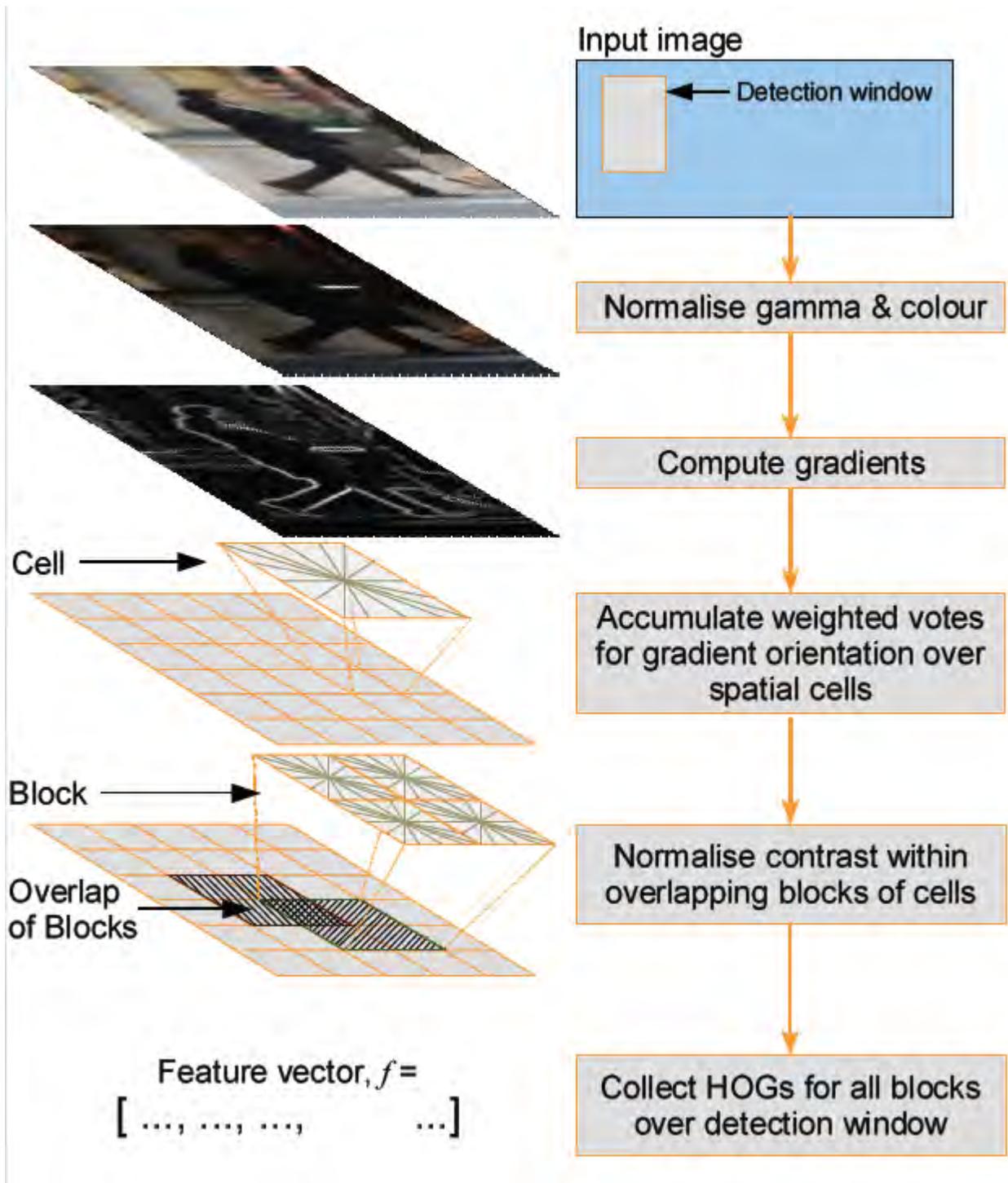


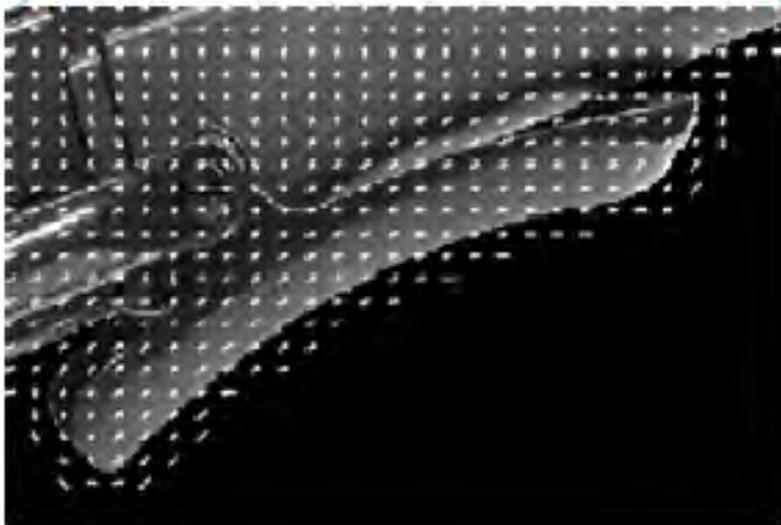
Figure 19: Algorithme de HOG



**a**



**b**



**c**

Figure 20: Distribution des caractéristiques HOG dans la crosse pliante d'un AKM47

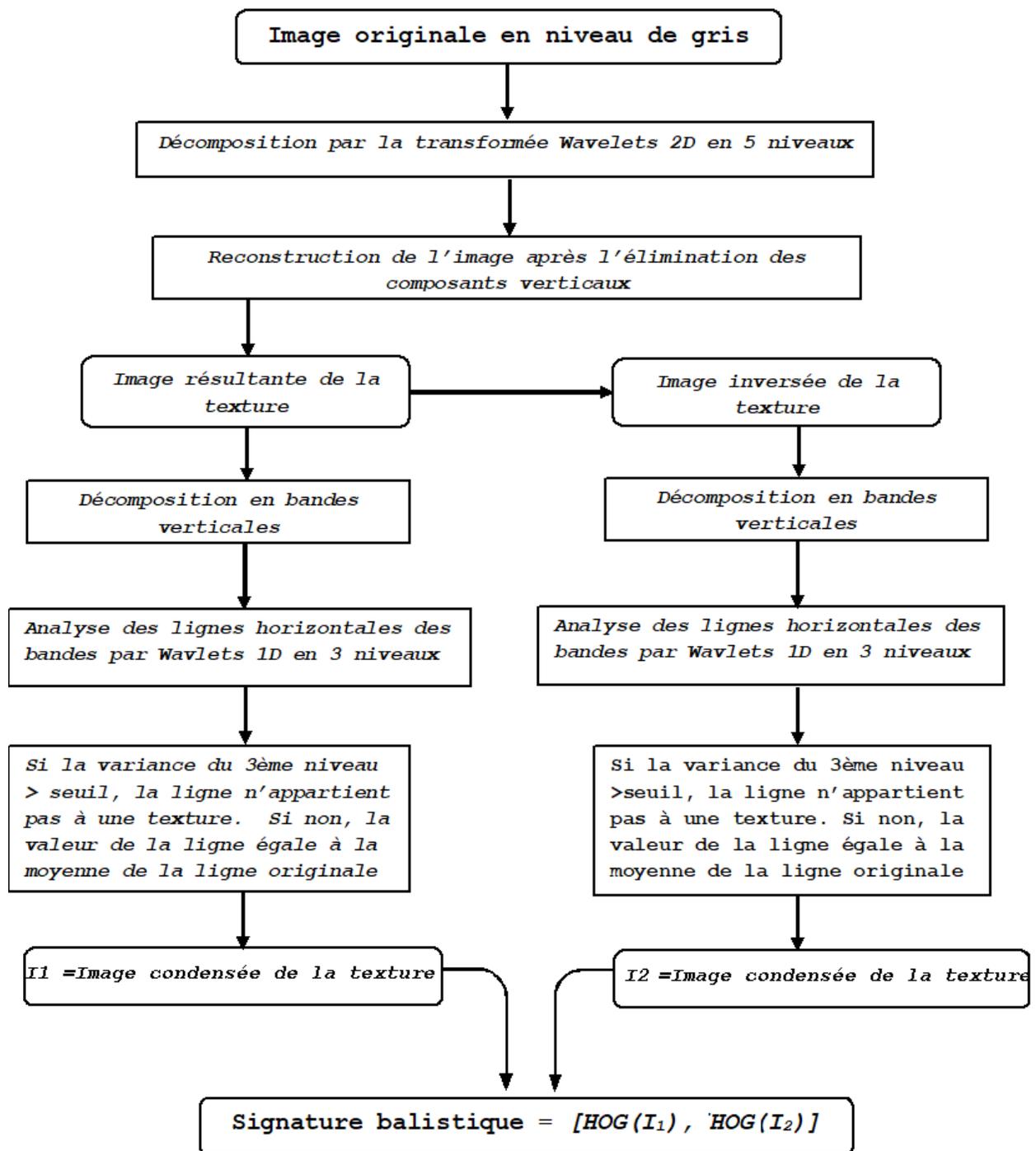


Figure 21: Processus d'extraction de la signature balistique

### 6.3 Modélisation de la signature balistique par *machine learning* (ML)

Dans le cas des armes à feu, l'information associée aux traces laissées sur les projectiles de référence d'un même canon, souffre d'un manque de reproductibilité d'un tir à l'autre, dans le temps ou par l'effet de l'usage de l'arme. La signature balistique évolue d'un tir à l'autre. Cette absence de reproductibilité n'est pas une spécificité de ce domaine forensique. En effet, l'écriture manuscrite, la signature, la voix, le visage sont autant de modalités qui évolue dans le temps. Cela contraste avec le domaine de la lophoscopie où il est communément admis (exception faite des cicatrices profondes) que l'empreinte digitale est très reproductible dans le temps. Il en va de même pour le profil ADN d'un individu. Il n'est pas possible, à partir d'une seule acquisition d'une impression de champ, de faire la distinction entre les caractéristiques laissées par le champ et les traces laissées par d'autres sources. De ce fait, et afin de modéliser les caractéristiques d'un champ de canon, tout en écartant les traces laissées par d'autres sources, le recours aux techniques de l'apprentissage automatique est proposé dans le cadre de la présente étude. Selon les études réalisées dans le domaine de l'automatisation de l'identification des projectiles, seules trois études (Monkres et al. 2013), (Hare, Hofmann, and Carriquiry 2017) et (Pisantanaroj et al. 2020), parmi les trente études citées dans le tableau 1, ont utilisé la modélisation par des techniques d'apprentissage automatique pour l'étape de comparaison. Par modélisation dans notre contexte, nous entendons un apprentissage supervisé où les classes de sorties sont les classes définies par chaque champ individuellement (représenté par plusieurs images chacun). Les prédicteurs sont l'extraction des caractéristiques de chaque champ selon la procédure d'extraction précédemment décrite, soit un vecteur de 7920 variables. L'objectif primaire du classificateur est d'associer une image d'un champ à un champ potentiel (associé à un projectile). La question de la combinaison des champs pour classer des projectiles est réglée séparément sur la base des résultats associés aux champs considérés individuellement. Finalement, la modélisation est celle des caractéristiques issues des images elles-mêmes et pas d'un score issu d'une comparaison entre deux champs. Il ne s'agit pas d'un système *score-based* (exploitant le résultat numérique d'une comparaison), mais d'un système *feature-based* c'est-à-dire directement informé tant pour la trace que la référence par les caractéristiques extraites.

Afin de modéliser cette signature balistique de l'impression de champ, plusieurs techniques d'apprentissage supervisé du package **CARET** (Kuhn 2008), ont été testés, notamment *Random Forest*, *Decision Trees*, *K-Nearest Neighbor*, *Mixture Discriminant Analysis*, *Regularized Discriminant Analysis*, *Linear Discriminant Analysis*, *Naive Bayes*, *eXtreme Gradient Boosting* et *Support Vector Machine*. Les techniques de validation croisées disponibles dans **CARET** ont été exploitées. Chaque modèle testé sera appelé directement par **CARET** qui invoquera les bibliothèques associées.

Le modèle le plus efficace, en matière de précision et du coût calculatoire, sera choisi. Les performances du modèle choisi seront mesurées et également comparées aux performances des deux autres systèmes automatiques d'identification balistique, à savoir **IBIS TRAX3D** et **EVOFINDER**.

## 7 Acquisition, échantillonnage et méthodes d'évaluation des résultats

### 7.1 Acquisition

Afin de standardiser l'acquisition des impressions de champs, le protocole décrit plus haut a été adopté.

### 7.2 Échantillonnage

Afin d'évaluer le système développé, une base de données a été créée et alimentée continuellement par des tirs de références effectués par des armes de type Kalachnikov AK 47 de calibre 7.62 x 39. Il s'agit du type d'arme le plus utilisé dans les affaires criminelles, récupérées dans les différentes affaires traitées, durant les années 2016 et 2017, au niveau du département balistique de l'Institut National de Criminalistique et de Criminologie de la Gendarmerie Nationale algérienne. La majorité de ces armes ont été fabriquées avant 1990, et la plupart de ces dernières ont été fabriquées dans les années soixante-dix par différents fabricants et dans plusieurs pays, tels que la Russie, la Chine et des pays de l'Europe de l'Est. Au total, 200 armes sont actuellement saisies dans cette base de données. Cinq tirs de référence ont été effectués par les 60 premières armes avec l'utilisation de munition ordinaire fabriquée par ERIS-Algérie, et six tirs de référence ont été réalisés par le reste des armes avec le même type de munition. Le tableau 3 résume le nombre de projectiles de référence tirés par ces armes à feu.

Table 3: Nombre de projectiles tirés par chaque arme

Armes	Nombre.de.projectiles.tirés
du 1 au 60	5
du 61 au 200	6

### 7.3 Définitions des indicateurs de performances

Afin d'évaluer ses performances, le système proposé sera confronté aux deux scénarios rencontrés dans l'expertise balistique, à savoir le scénario *projectile-projectile* et le scénario *projectile-arme*. Le premier scénario est de nature investigative, alors que le second peut être soit de nature investigative ou de nature évaluative.

Il est utile de préciser, que pour les cas de nature évaluative, avant la communication des résultats aux requérants, une vérification de calibration des rapports de vraisemblance (Ramos and Gonzalez-Rodriguez 2013), obtenus sous les deux hypothèses  $H_p$  et  $H_d$ , va être effectuée.

Dans les cas impliquant des tirs, selon l'interaction du projectile avec des objets solides lors de sa trajectoire, celui-ci peut être récupéré soit non endommagé, endommagé (quelques impressions de champs pouvant être altérées) ou totalement inexploitable (aucune impression de champ n'est exploitable). Dans le cas d'un projectile exploitable mais fortement endommagé (comme par exemple en présence d'une seule impression de champ exploitable), la prédiction de l'arme qui a tiré ce projectile sera limitée à la considération d'un champ de canon qui a potentiellement laissé son impression sur le projectile. Ainsi, la liste des rapprochements générée par le système est une liste ordonnée des impressions de champs des armes de référence saisies dans la base de données où chaque impression est considérée individuellement dans un premier temps.

Dans le cadre de cette recherche, les tests seront effectués sur la base de cas simulés avec l'ensemble des impressions de champ sur chaque projectile, mais également en simulant des situations où un nombre limité d'impressions de champ est disponible. En l'état, nous avons considéré que la présence ou l'absence de l'impression sans tenir compte d'autres déformations élastiques qui pourraient être consécutives au tir.

### 7.3.1 Scénario projectile - projectile

Table 4: Combinaisons d'évaluation du système pour le cas projectile-projectile

Projectile.d.apprentissage	N..de.projectiles.de.test	Nombre.d.armes.dans.la.base.de.données
1	2, 3, 4 et 5	200
2	1, 3, 4 et 5	200
3	1, 2, 4 et 5	200
4	1, 2, 3 et 5	200
5	1, 2, 3 et 4	200
6	1, 2, 3, 4 et 5	140

Sur la base des caractéristiques extraites de l'image d'un champ, le résultat de la prédiction de la classe est une liste de scores ordonnés sur chacun des champs modélisés dans la base. Le passage du champ au projectile s'effectue de la manière suivante: Le score retenu pour la discrimination entre un projectile de test et les projectiles d'apprentissage est égal au plus grand des scores des phases entre ces deux projectiles. Étant donné que les impressions de champs sont supposées indépendantes, alors le score d'une phase est la somme des scores de la prédiction de chaque impression de champ du projectile par rapport aux modèles des impressions de champ des projectiles d'apprentissage.

$$SF_1 = S(L_1, M_1) + S(L_2, M_2) + S(L_3, M_3) + S(L_4, M_4)$$

$$SF_2 = S(L_1, M_2) + S(L_2, M_3) + S(L_3, M_4) + S(L_4, M_1)$$

$$SF_3 = S(L_1, M_3) + S(L_2, M_4) + S(L_3, M_1) + S(L_4, M_2)$$

$$SF_4 = S(L_1, M_4) + S(L_2, M_1) + S(L_3, M_2) + S(L_4, M_3)$$

Où  $S(L_i, M_j)$  est le score de discrimination entre l'impression de champ  $i$  du projectile de test et le modèle de l'impression de champ  $j$  d'un autre projectile.

Le score de discrimination =  $Max(SF_i), i = 1 : 4$

Afin d'évaluer le système automatique de discrimination proposé, deux types de résultats sont pris en considération, à savoir le taux de succès aux premiers rangs et le taux de rapprochement total.

Le pouvoir de discrimination par impression de champ ou la sélectivité par impression de champ ( $SIC$ ) est la proportion des impressions de champs correspondantes obtenues en première position.

Le pouvoir de rapprochement par impression de champ ( $RIC$ ) est l'aptitude du système à classer les impressions de champs correspondantes dans des positions proches de la première position.

Pour une impression de champ classée dans une position  $n$  où  $1 < n < N_{ic}$  dont  $N_{ic}$  est le nombre total des impressions de champs dans la base de données:

$$\text{le } RIC(n) = \frac{N_{ic}-n}{N_{ic}-1}, \text{ dont } RIC(1) = 1 \text{ et } RIC(N_{ic}) = 0$$

Le pouvoir de rapprochement total du système pour les impressions de champs:  $RTIC = \sum_{i=1}^{N_{ic}} (f_n RIC(n))$  où  $f_n$  est la fréquence relative de la position  $n$ .

Le pouvoir de discrimination par arme ou la sélectivité du système par arme à feu  $SAF$  est la proportion des armes bien classées dans la première position.

Le pouvoir de rapprochement par arme à feu  $RAF$  est l'aptitude du système à classer les armes dans des positions proches de la première position.

Le  $RAF(n) = \frac{N_{af}-n}{N_{af}-1}$  où  $N_{af}$  est le nombre total des armes à feu dans la base de données, dont  $RAF(1) = 1$  et  $RAF(N_{af}) = 0$

Le pouvoir de rapprochement total du système pour les projectiles est donc:  $RTAF = \sum_{i=1}^{N_{af}} (f_n RAF(n))$ .

### 7.3.2 Scénario projectile - arme

Pour ce scénario, les quatre configurations suivantes ont été envisagées (voir le tableau 5):

- Première configuration: deux projectiles consécutifs sont réservés pour l'apprentissage et les trois autres sont gardés pour le test.
- Deuxième configuration: trois projectiles consécutifs sont réservés pour l'apprentissage et les deux autres sont gardés pour le test.
- Troisième configuration: quatre projectiles consécutifs sont réservés pour l'apprentissage et le projectile restant est gardé pour le test.
- Quatrième configuration: pour les armes (N°61 au N°200), cinq projectiles consécutifs sont réservés pour l'entraînement et un projectile est gardé dans le test.

Le résultat de la prédiction, selon la méthode d'apprentissage choisie, est une probabilité a posteriori de discrimination  $P(H|E)$ <sup>28</sup>

Pour chaque configuration, les deux cas rencontrés dans la pratique forensique ont été pris en considération, à savoir le cas où l'arme suspecte a été saisie dans la base de données avant la commission des faits allégués, et le cas dans lequel l'arme suspecte ne figure pas dans la liste des armes saisies de la base de données avant la commission des faits.

Par exemple, l'avant-dernière ligne du tableau 5 représente le cas où cinq projectiles de référence de l'arme suspecte ont été saisis dans la base de données avant la commission des faits, dont le projectile N°6 a été récupéré. La dernière ligne du même tableau par contre représente le cas le projectile N°1 a été récupéré, avant la saisie des cinq projectiles de l'arme suspecte.

**7.3.2.1 Cas d'une impression de champ donnée** Pour calculer le rapport de vraisemblance  $LR_{ij}$ , après la prédiction de la classe de l'impression de champ  $i$ , du projectile récupéré, par le modèle du champ  $j$  d'une arme suspecte, on utilise la probabilité a posteriori  $P(H_{ij}|E)$  et le nombre des classes de champs dans la base de données  $N_{IC} = 4N_{AF}$  où  $N_{AF}$  est le nombre total des armes dans cette base de données.

$$LR_{ij} = \frac{P(E|H_{ij})}{P(E|\bar{H}_{ij})} = \frac{P(H_{ij}|E) P(\bar{H}_{ij})}{P(\bar{H}_{ij}|E) P(H_{ij})} = \frac{P(H_{ij}|E)}{1-P(H_{ij}|E)} (4N_{AF} - 1)$$

**7.3.2.2 Cas projectile** Avant de calculer le rapport de vraisemblance  $LR_K$ , pour qu'un projectile récupéré soit tiré par une arme  $K$ , il faut d'abord trouver la phase qui maximise la somme des probabilités a posteriori pour les différentes combinaisons entre les impressions de champs du projectile en question et les modèles de champs  $M_{ik}$  de l'arme  $k$

$$\text{Probabilité de phase}_1 = PF_{1k} = P(L_1, M_{1k}) + P(L_2, M_{2k}) + P(L_3, M_{3k}) + P(L_4, M_{4k})$$

$$\text{Probabilité de phase}_2 = PF_{2k} = P(L_1, M_{2k}) + P(L_2, M_{3k}) + P(L_3, M_{4k}) + P(L_4, M_{1k})$$

$$\text{Probabilité de phase}_3 = PF_{3k} = P(L_1, M_{3k}) + P(L_2, M_{4k}) + P(L_3, M_{1k}) + P(L_4, M_{2k})$$

$$\text{Probabilité de phase}_4 = PF_{4k} = P(L_1, M_{4k}) + P(L_2, M_{1k}) + P(L_3, M_{2k}) + P(L_4, M_{3k})$$

Dont  $P(L_i, M_{jk})$  est la probabilité a posteriori  $P(H_{i,jk}|E)$ , et  $H_{i,jk}$  est l'hypothèse que le champ  $j$  de l'arme suspecte  $k$  est à l'origine de l'impression de champ  $i$  du projectile récupéré.

$$P(H_k|E) = \text{Max}(PF_{ik}), i = 1 : 4$$

$$\text{De la même manière: } LR_k = \frac{P(E|H_k)}{P(E|\bar{H}_k)} = \frac{P(H_k|E) P(\bar{H}_k)}{P(\bar{H}_k|E) P(H_k)} = \frac{P(H_k|E)}{1-P(H_k|E)} (N_{AF} - 1)$$

<sup>28</sup>Étant donné que le LR est calculé à partir de la probabilité a posteriori  $P(H|E)$ , la calibration, objet du chapitre 8 de ce manuscrit, a été effectuée sur les LR obtenus au lieu de l'appliquer sur les probabilités a posteriori issues de la prédiction.

Table 5: Combinaisons d'évaluation du système pour le scénario projectile-arme

Configuration	Apprentissage	N.test	Taille.de.DB
02 projectiles	1,2	3	200
02 projectiles	1,2	4	200
02 projectiles	1,2	5	200
02 projectiles	1,2	6	200
02 projectiles	2,3	1	200
02 projectiles	2,3	4	200
02 projectiles	2,3	5	200
02 projectiles	2,3	6	200
02 projectiles	3,4	1	200
02 projectiles	3,4	2	200
02 projectiles	3,4	5	200
02 projectiles	3,4	6	200
02 projectiles	4,5	1	200
02 projectiles	4,5	2	200
02 projectiles	4,5	3	200
02 projectiles	4,5	6	200
02 projectiles	5,6	1	140
02 projectiles	5,6	2	140
02 projectiles	5,6	3	140
02 projectiles	5,6	4	140
03 projectiles	1,2,3	4	200
03 projectiles	1,2,3	5	200
03 projectiles	1,2,3	6	200
03 projectiles	2,3,4	1	200
03 projectiles	2,3,4	5	200
03 projectiles	2,3,4	6	200
03 projectiles	3,4,5	1	200
03 projectiles	3,4,5	2	200
03 projectiles	3,4,5	6	200
03 projectiles	4,5,6	1	140
03 projectiles	4,5,6	2	140
03 projectiles	4,5,6	3	140
04 projectiles	1,2,3,4	5	200
04 projectiles	1,2,3,4	6	200
04 projectiles	2,3,4,5	1	200
04 projectiles	2,3,4,5	6	200
04 projectiles	3,4,5,6	1	140
04 projectiles	3,4,5,6	2	140
05 projectiles	1,2,3,4,5	6	200
05 projectiles	2,3,4,5,6	1	140

## 8 Les performances des systèmes en mode investigatif

Dans une première partie, nous décrivons les deux systèmes de comparaison automatique utilisés dans le cadre de la comparaison avec le système développé dans la présente recherche, système nommé *BulleText*. Il s'agit du système *IBIS TAX-3D* et le système *EVOFINDER*. Dans une deuxième partie, les résultats de la comparaison sont présentés en exploitant des mesures de performance choisies.

### 8.1 Description des systèmes concurrents

#### 8.1.1 Le système EVOFINDER

**EVOFINDER** (combinaison entre deux termes anglais *Evidence* et *Finder*) est un système automatique de rapprochement balistique développé par la société germano-russe **ScannBI Technology**. Sa première commercialisation date de 1995 sous le nom original *TAIS* (*Trace Automated Identification and System*). Durant l'année 1998, ladite société a commencé le développement du prototype d'un deuxième système composé d'un ensemble intégré d'une caméra d'acquisition *CCD*, d'une matrice émettrice de lumière diffusante à grand-angle par le biais de quatre diodes électroluminescentes, de quatre moteurs pas à pas pour le contrôle de la focalisation de la caméra et le mouvement de translation et rotation de l'élément de munition. Les acquisitions sont répertoriées et sauvegardées dans une base de données.

Le système est actuellement utilisé dans le monde par 50 laboratoires de 20 pays sur quatre continents (Europe, l'Amérique du Nord, l'Amérique du Sud et l'Afrique).

La partie hardware du système est composée d'un seul instrument, de dimension et poids raisonnable (figure 22) pour la numérisation tant des projectiles et des douilles.

Quant à la partie software, elle permet :

- L'ouverture de dossier pour la pièce à numériser;
- L'enregistrement des données démographiques et techniques associées au cas et à la pièce;
- La délimitation de la hauteur de l'acquisition et sa qualité (rapide ou précise) (figure 23);
- L'annotation des zones d'intérêt (pour le cas de projectile : au niveau des impressions de champ et de rayure);
- L'extraction d'une signature balistique, à partir des zones d'intérêt, par l'application des algorithmes propriétaires à la société **ScannBI**;
- La corrélation entre la pièce saisie et d'autres pièces ayant les mêmes caractéristiques de classe avec la possibilité de restreindre la corrélation par l'application de plusieurs filtres (figure 24);
- Donner la possibilité de sauvegarder les images de la pièce ou celles des comparaisons effectuées entre deux pièces (figure 25), sous trois types: *2D*, *2D+d* et *3D* (figure 27);
- Donner la possibilité de sauvegarder les résultats de corrélation sous format d'un tableau Excel.

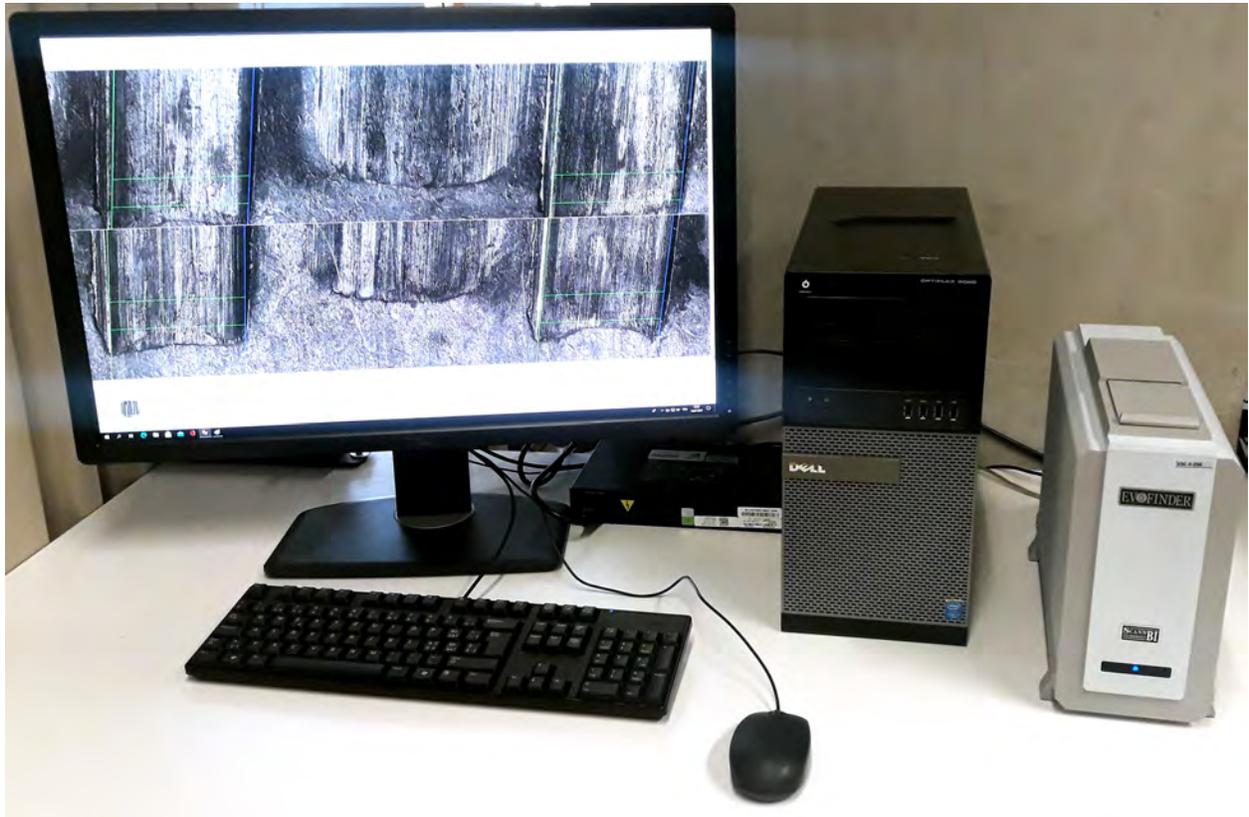


Figure 22: En haut: Photo illustrative du système *EVOFINDER* utilisé dans le cadre de cette recherche.  
En bas: Porte-pièce du système *EVOFINDER*

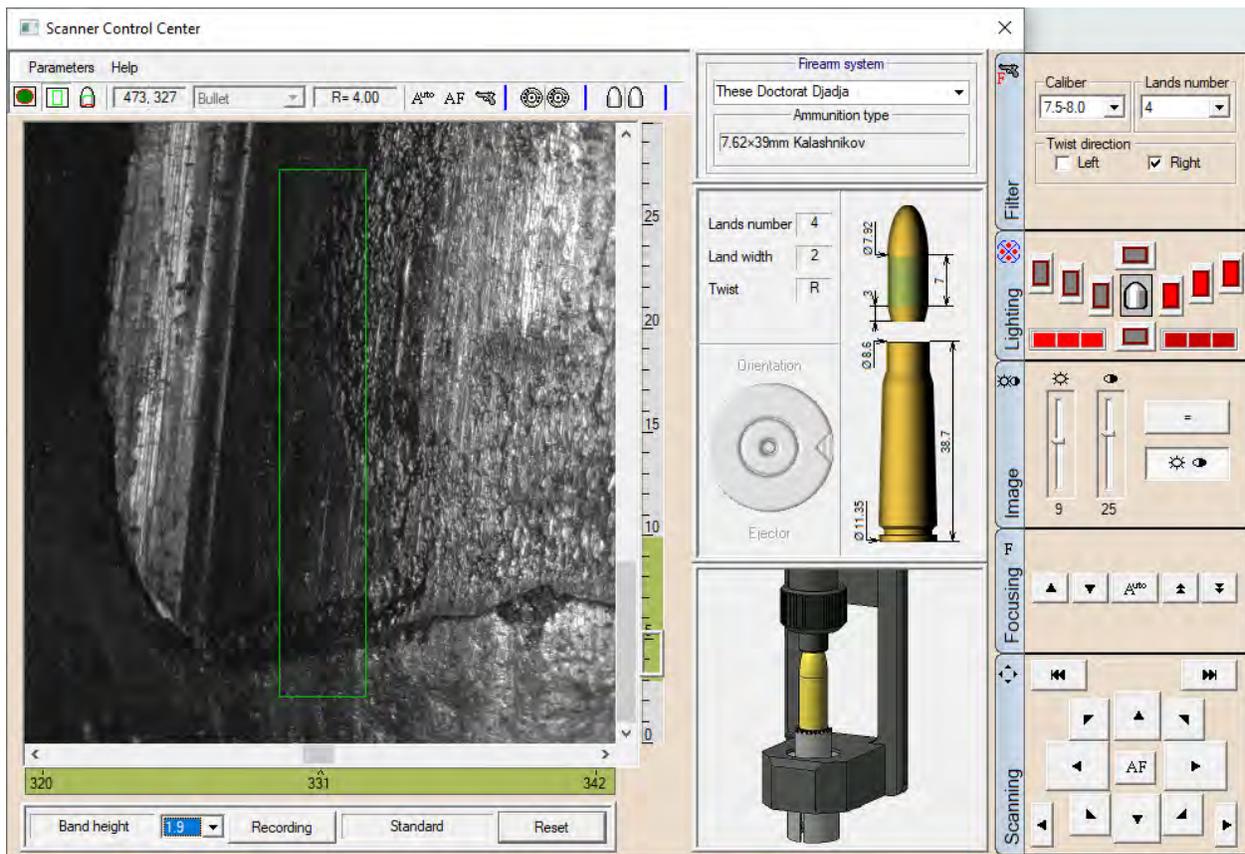


Figure 23: Fenêtre de contrôle des paramètres d'acquisition du système *EVOFINDER*

Saved result. Specimen under examination: AA-068-3. Expert name: H. Djadja. Date: 04.03.2021.

Secondary (land)

Specimen ID	Nr	Firearm system	Similarity	N Max
▲ AA-118-3	1	These Doctorat Djadja	0.232	1
▲ AA-135-2	2	These Doctorat Djadja	0.225	1
● AA-028-1	3	These Doctorat Djadja	0.223	1
■ T-057-F1	4	These Doctorat Djadja	0.217	1
▲ AA-152-2	5	These Doctorat Djadja	0.207	1
● AA-087-3	6	These Doctorat Djadja	0.206	2
▲ AA-092-4	7	These Doctorat Djadja	0.205	1
▲ AA-058-2	8	These Doctorat Djadja	0.204	3
▲ AA-129-4	9	These Doctorat Djadja	0.203	1
■ T-101-F1	10	These Doctorat Djadja	0.201	1
▲ AA-008-4	11	These Doctorat Djadja	0.199	1
● T-039-F1	12	These Doctorat Djadja	0.198	2
■ AA-014-4	13	These Doctorat Djadja	0.197	1
● AA-057-1	14	These Doctorat Djadja	0.197	1
▲ AA-180-3	15	These Doctorat Djadja	0.195	1
▲ T-090-F1	16	These Doctorat Djadja	0.195	2
■ AA-089-3	17	These Doctorat Djadja	0.194	1
■ AA-100-1	18	These Doctorat Djadja	0.194	1
▲ AA-048-4	19	These Doctorat Djadja	0.194	1
▲ AA-025-3	20	These Doctorat Djadja	0.192	2
▲ AA-161-4	21	These Doctorat Djadja	0.192	3
■ AA-068-2	22	These Doctorat Djadja	0.191	2
■ AA-078-4	23	These Doctorat Djadja	0.191	1
● T-135-F1	24	These Doctorat Djadja	0.191	1
● AA-083-1	25	These Doctorat Djadja	0.190	3
▲ T-177-F1	26	These Doctorat Djadja	0.190	1
● AA-066-2	27	These Doctorat Djadja	0.190	2
■ AA-057-4	28	These Doctorat Djadja	0.189	1
▲ T-140-F1	29	These Doctorat Djadja	0.189	1
▲ T-123-F2	30	These Doctorat Djadja	0.188	2
● copyAA-011-2	31	These Doctorat Djadja	0.185	1
▲ T-086-F2	32	These Doctorat Djadja	0.185	2
■ AA-076-4	33	These Doctorat Djadja	0.185	2
▲ T-066-F1	34	These Doctorat Djadja	0.184	2
▲ AA-131-2	35	These Doctorat Djadja	0.184	2
■ AA-124-3	36	These Doctorat Djadja	0.183	1
▲ AA-026-1	37	These Doctorat Djadja	0.182	2
▲ T-097-F2	38	These Doctorat Djadja	0.182	1
▲ AA-065-2	39	These Doctorat Djadja	0.182	1
● AA-012-3	40	These Doctorat Djadja	0.181	1
● AA-050-4	41	These Doctorat Djadja	0.181	2

Firearm system

7.62×39mm (Kalashnikov) 4R

These Doctorat Djadja

Filter out

Spm in list  
1149  
Search time  
0:00:00

Specimen ID  
AA-068-2

Expert name  
H. Djadja

Material  
Cooper

Cartridge

Entry date  
16.12.2020

Collection date  
16.12.2020

Storage place

Criminal case

File number  
Unknown

Date  
29.10.2014

Criminal case title

Case description

Serial number  
068

Object type  
Test fire

Comments

Filter out

Object type

Expert name

Material

Criminal case

Date

From To

Entry date  
15.07.2021 15.07.2021

Collection date  
15.07.2021 15.07.2021

Criminal case  
15.07.2021 15.07.2021

Find sub string in

Specimen ID  
012

Criminal case

Serial number

Comments

Load Histogram Search

Export Import

Expanded search

Autosave results

Excel Load results Save results

Hide Close Help

Figure 24: Exemple d'une liste de corrélations effectuées par le système *EVOFINDER*

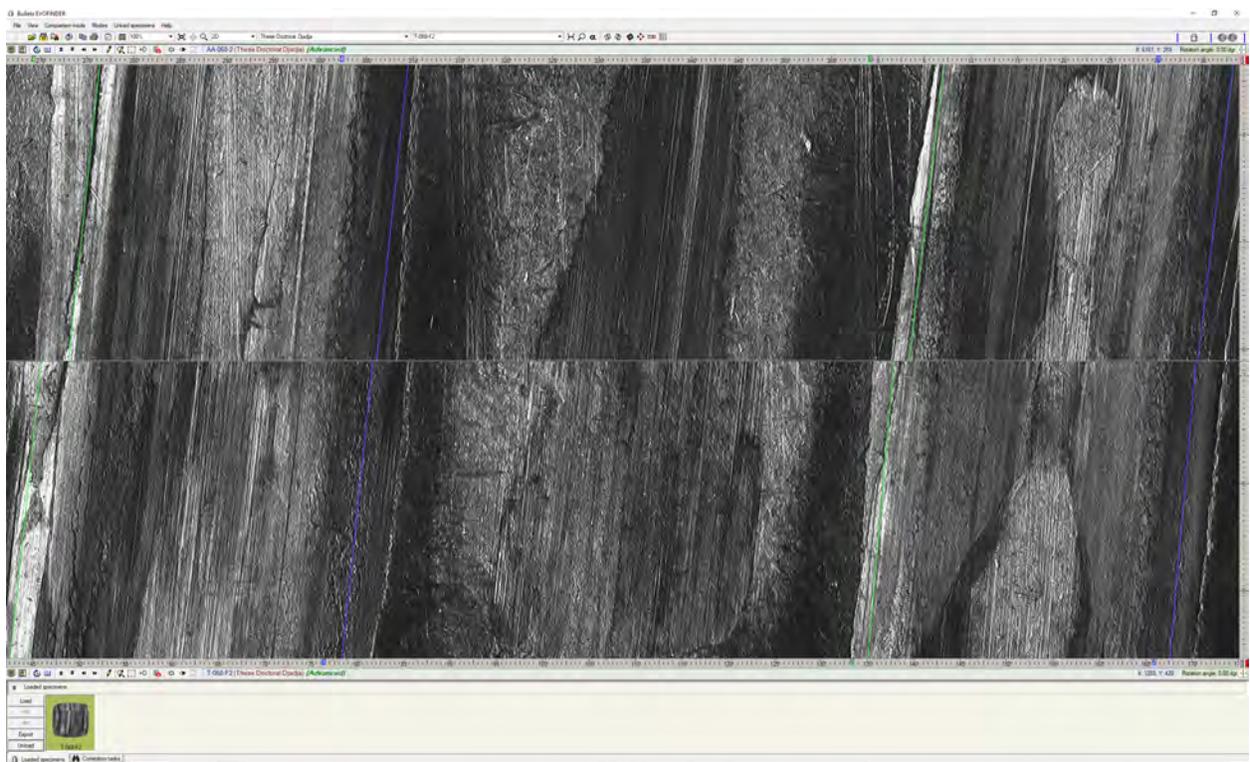


Figure 25: Comparaison entre deux projectiles sous le système *EVOFINDER*

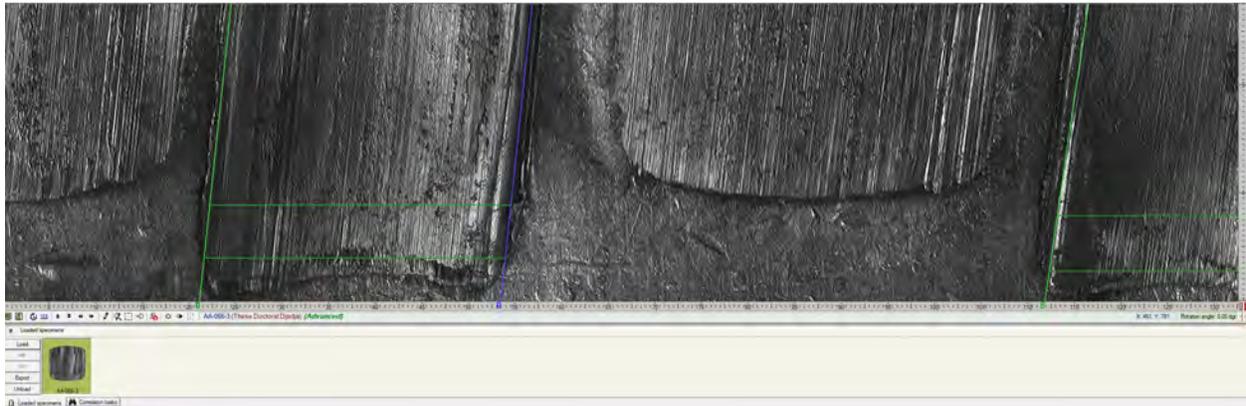


Figure 26: Image d'acquisition de type 2D d'un projectile par le système *EVOFINDER*

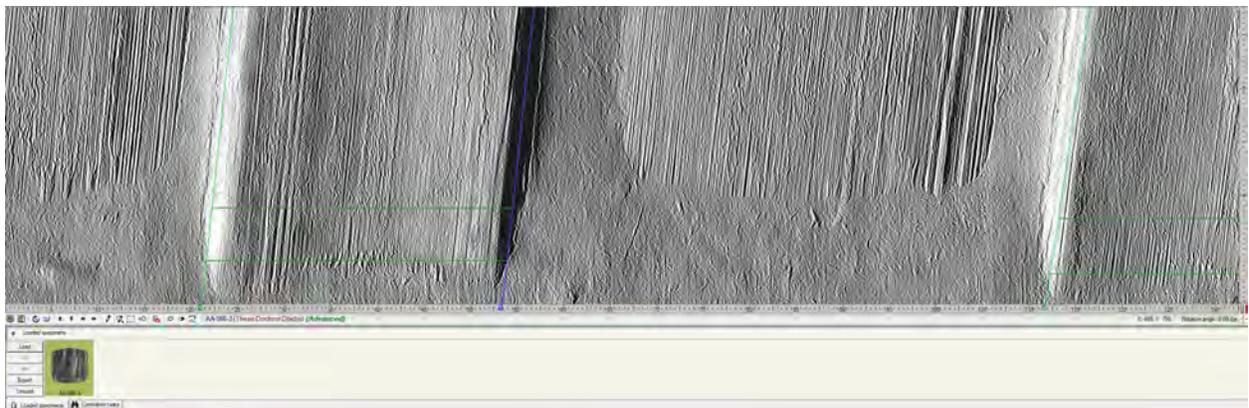
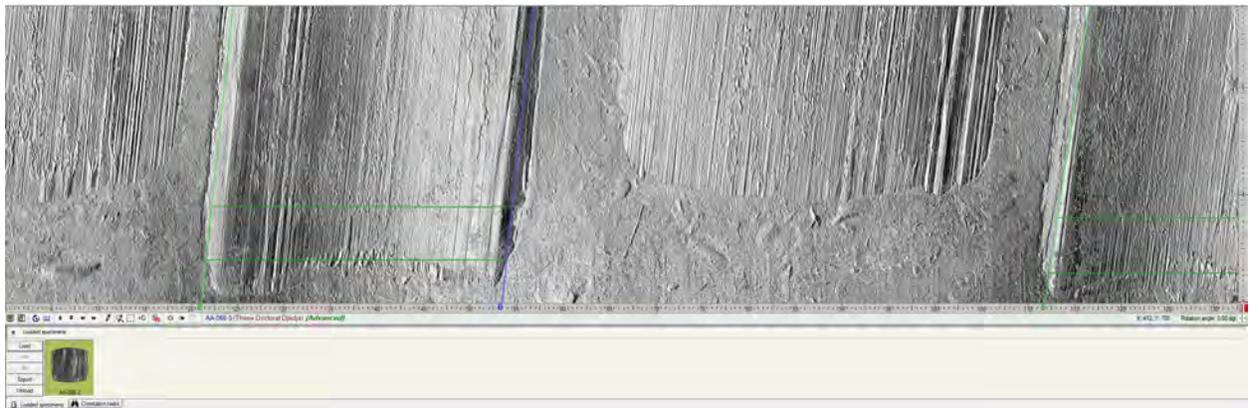
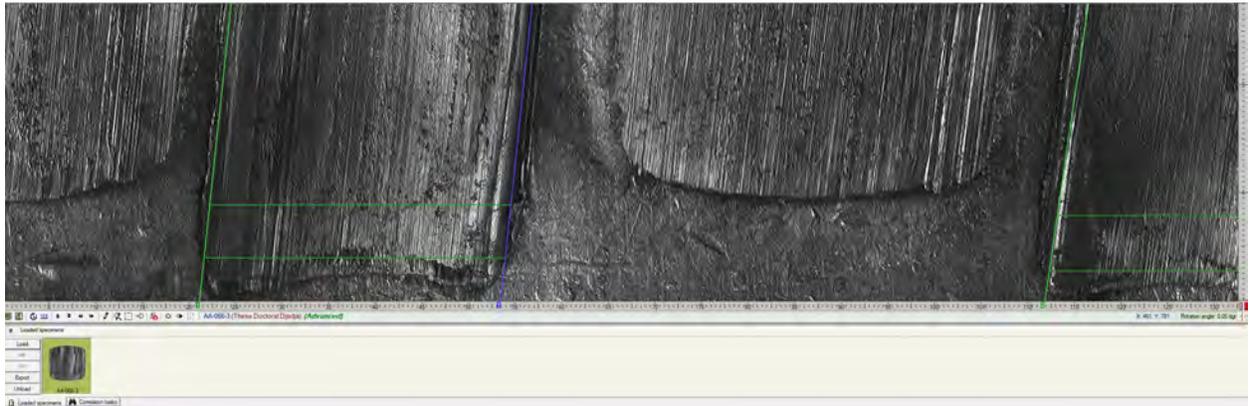


Figure 27: Image d'acquisition: de type  $2D$ , en haut, de type  $2D+d$  au milieu et de type  $3D$  en bas

Contrairement au système *IBIS TRAX3D*, qui va faire l'objet de la section suivante, le système *EVOFINDER* n'exploite que les zones annotées et non pas toute la surface numérisée du projectile.

Pour l'annotation des impressions de champs, le guide d'utilisateur de *EVOFINDER* invite à annoter la base de l'impression de champ, qui est plus stable et reproductible selon ce guide, par un parallélogramme d'une hauteur de  $0.22\text{ mm}$ . Le soussigné a opté, dans un premier temps, pour l'annotation des zones d'intérêt en utilisant d'un parallélogramme de hauteur de  $0.5\text{ mm}$ , qui est jugée suffisante pour couvrir le minimum des traces microscopiques, et d'utiliser dans un deuxième temps un parallélogramme d'une hauteur de  $0.22\text{ mm}$  selon les instructions du système *EVOFINDER* (figure 28).

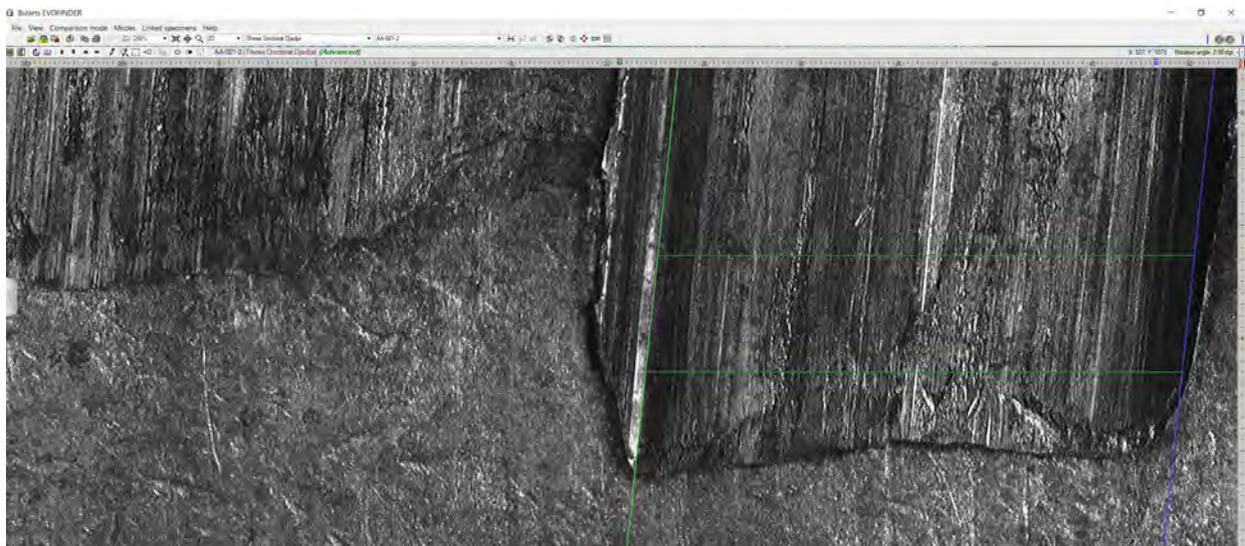


Figure 28: Les deux hauteurs d'annotation adoptées. En haut:  $0.22\text{ mm}$ . En bas:  $0.5\text{ mm}$

Comme mentionné précédemment, deux cents armes de type Kalashnikov *AKM 47* ont été sélectionnées pour la partie expérimentale. Cinq projectiles consécutifs de référence ont été récupérés pour les soixante premières armes, tandis que six projectiles consécutifs de référence ont été récupérés pour les cent quarante armes restantes. Au total, mille cent quarante projectiles ont été exploités.

Les quatre premiers projectiles de chaque arme ont été codifiés par *AA\_xxx\_y*, où *xxx* désigne l'identifiant de l'arme (prend les valeurs entre *001* et *200*) et *y* est le numéro de projectile (prenant les valeurs entre *1*, *2*, *3* ou *4*). Par exemple *AA\_058\_3* est l'identifiant du troisième projectile de référence de l'arme numéro *58*.

Les cinquième et sixième projectiles, réservés comme projectiles de test pour l'évaluation des résultats du système *IBIS TRAX3D*, objet du prochain point, ont été codifiés par *T\_xxx\_Fy*, où *xxx* désigne le numéro d'arme (prend les valeurs entre *001* et *200*) et *y* est le numéro de projectile (prenant la valeur *1*, pour le cinquième projectile, ou *2*, pour le sixième projectile). Par exemple *T\_120\_F2* est l'identifiant du sixième projectile de référence de l'arme numéro *120*.

Dans le système *EVOFINDER*, la corrélation entre deux projectiles est présentée sous forme d'une ligne de 18 cellules (figure 29), dont la première donne l'identifiant du projectile à comparer, la deuxième est réservée pour le résultat de corrélation entre les deux projectiles, et les seize cellules restantes sont dédiées aux résultats de corrélation entre les impressions de champs des deux projectiles.

Le résultat de corrélation entre deux projectiles n'est rien d'autre que le maximum des résultats de corrélation entre leurs impressions de champs. La manière dont la corrélation est calculée n'est pas divulguée par le fabricant. Le terme *corrélation* indique la mesure de proximité calculée.

Les listes de corrélation peuvent être sauvegardées sous un fichier au format *CSV* (*comma-separated value*).

Les 1140 fichiers de corrélation ont été importés dans R avec le logiciel IDE *RStudio* (RStudio Team 2022) couplé à la suite *Tidyverse* (Wickham, n.d.).

Chaque fichier est composé de *1139* lignes, représentant les résultats de corrélation avec les projectiles de référence des autres *199* AKM (*5* projectiles pour les armes portant l'identifiant du *001* au *060* et *6* projectiles pour les armes portant l'identifiant du *061* au *200*), ainsi que les résultats de corrélation avec les autres projectiles tirés par l'arme en question (*5* projectiles pour les armes portant l'identifiant du *001* au *060*, et *6* projectiles pour les armes portant l'identifiant du *061* au *200*).

Pour chacun des *199* AKM, seul le projectile ayant le grand score de corrélation est gardé, chose qui va réduire le fichier de *1139* lignes aux *203* lignes (*199 + 4*), pour les armes ayant l'identifiant de *001* au *060* ou *204* lignes (*199 + 5*), pour les armes ayant l'identifiant de *061* au *200*.

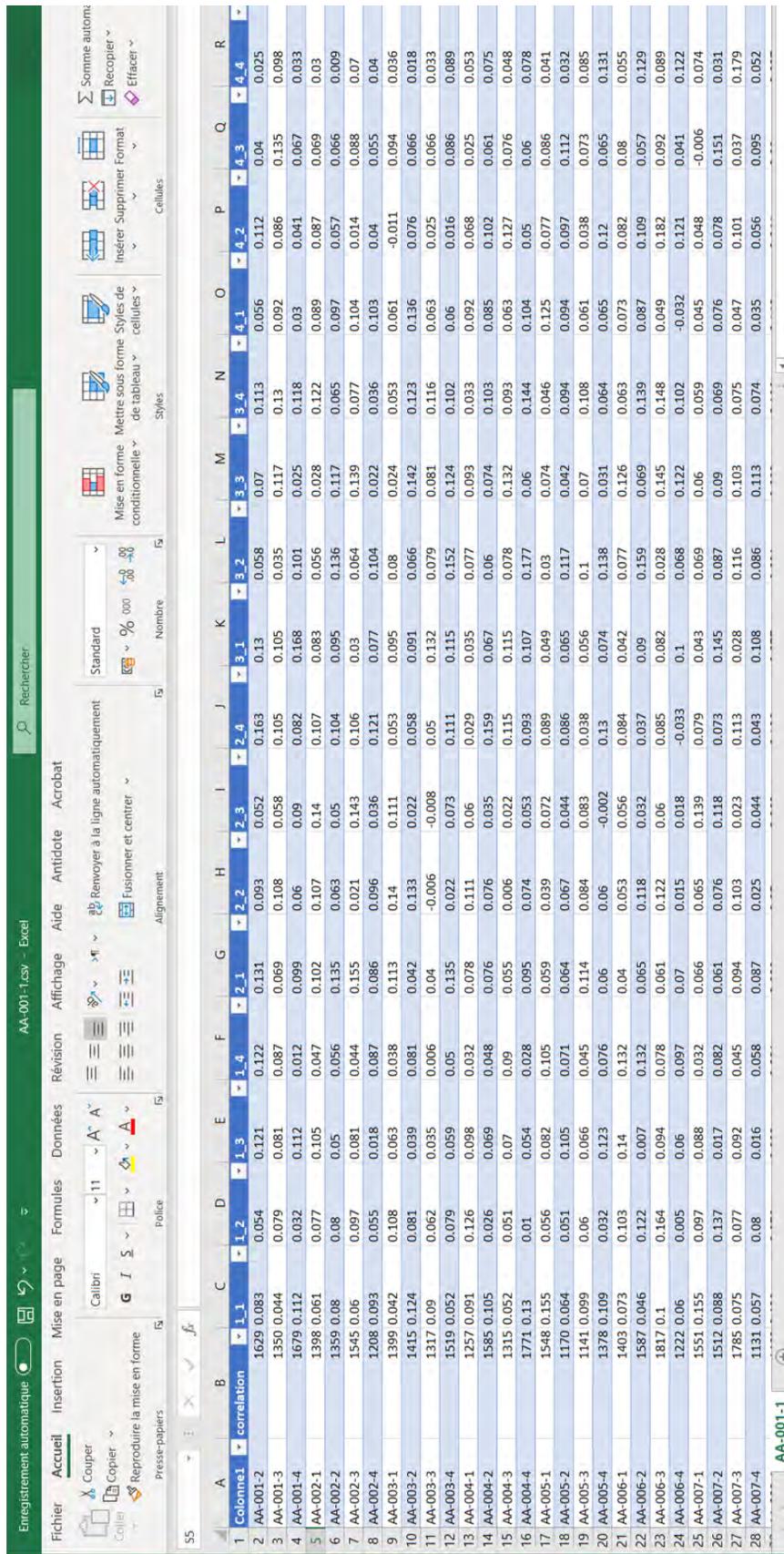


Figure 29: Exemple de résultats de corrélation du système EVOFINDER

### 8.1.2 Le système IBIS TRAX-3D

Le système **IBIS**, acronyme (*Integrated Ballistic Identification System*), commercialisé par la société canadienne *Ultra Forensic Technology*, a connu trois générations, *IBIS Heritage*, *IBIS TRAX-3D* et *IBIS TRAX-HD3D*.

La première génération, *IBIS Heritage*, est composée d'une station *DAS* (*Data Analysis Station*) pour l'acquisition des projectiles et douilles, d'une station *SAS* (*Signal Analysis Station*), d'une station *Match point* pour le calcul des corrélations, d'un concentrateur de données et d'un serveur. Comme précédemment, le terme de **corrélation** rend compte d'un calcul de distance propriétaire entre les deux éléments de munition comparés.

La seconde génération, *IBIS TRAX-3D*, est composée, d'une station *BRASSTRAX-3D* pour l'acquisition des douilles, d'une station *BULLETRAX-3D* pour l'acquisition des projectiles, d'une station *Match Point Plus* pour la recherche des corrélations, d'un concentrateur de données et d'un serveur.

La dernière génération, *IBIS TRAX-HD3D*, a gardé la même architecture d'*IBIS TRAX-HD3D*, avec une station *BRASSTRAX-HD3D* pour l'acquisition des douilles, d'une station *BULLETRAX-HD3D* pour l'acquisition des projectiles, d'une station *Match Point Plus* pour la recherche des corrélations, d'un concentrateur de données et d'un serveur.

Les stations *BULLETRAX-3D* et *Match Point Plus* du système *IBIS TRAX3D*, installé au niveau du département balistique de l'Institut National de Criminalistique et de Criminologie de la Gendarmerie Nationale (*INCC/GN*), ont été utilisées pour la numérisation de mille cent quarante projectiles de référence, issus des tirs effectués par les deux cents armes de types Kalashnikov *AKM 47*.

La figure 30 présente l'architecture du système *IBIS TRAX-3D*.

Il est utile de signaler que les deux grandes différences entre le système *IBIS TRAX-3D* et le système *IBIS Heritage* sont :

- La topographie de la surface du projectile est réalisée, dans le système *IBIS TRAX-3D* grâce à un dispositif équipé d'un microscope confocal, permettant l'acquisition de quatre-cents images (une image chaque 5 micromètres) pour la même zone du projectile. Ainsi, pour un projectile de 9 mm, la récupération de la topographie de sa surface est composée de dix-huit mille (18000) images prises sur 40 zones.
- L'extraction de la signature et la recherche des corrélations sont effectuées par des algorithmes différents de ceux utilisés par *IBIS Heritage*. Ces algorithmes sont propriétaires.

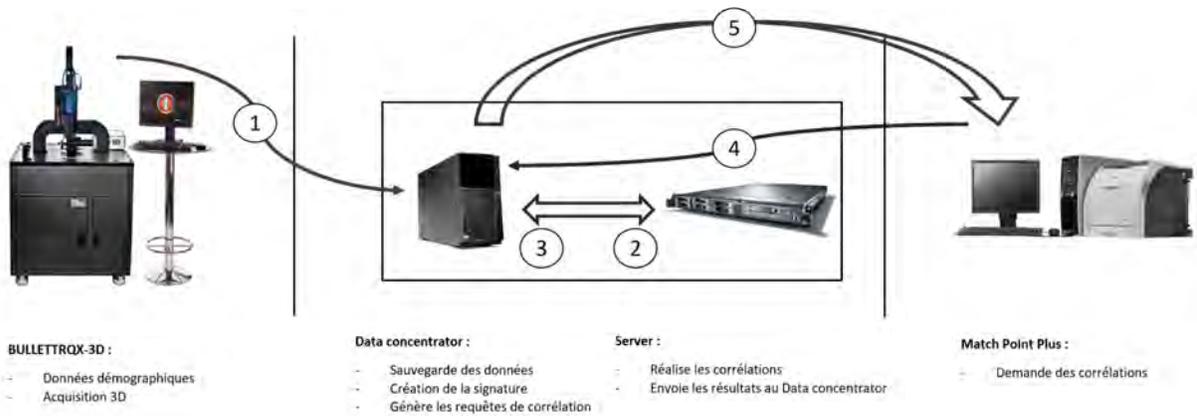


Figure 30: En Haut: Photo illustrative de la station *BULLETRQX-3D* utilisée dans le cadre de cette recherche. En bas: architecture du système *IBISTRAX3D*

Contrairement au système *EVOFINDER*, le système *IBISTRAX 3D* ne donne pas la possibilité de numériser un projectile avant la création d'un numéro de dossier et d'attribuer un numéro de pièce au projectile. Pour cela, afin de saisir les quatre projectiles de référence un numéro de dossier, codifié par  $AAx$ , a été créé pour chaque arme, où  $x$  désigne le numéro d'arme et prend les valeurs de 1 à 200, et un numéro de pièce, sous la forme  $Ax-TEPy$ , a été assigné pour chaque projectile, où  $y$  désigne le numéro du projectile de référence et prend les valeurs de 1 à 4.

Pour la numérisation du premier projectile de test, c'est-à-dire le cinquième projectile, un numéro de dossier, sous la forme  $F-x-F$ , et un numéro de pièce, sous la forme  $PSC-y$ , ont été créés. Pour la numérisation du deuxième projectile de test, c'est-à-dire le sixième projectile, un numéro de dossier, sous la forme  $F2-x-F2$ , et un numéro de pièce, sous la forme  $PSC-y$ , ont été créés.

Par exemple,  $AA107$  et  $A107-TEP3$  représentent respectivement le numéro de dossier de l'arme numéro 107 et le numéro de pièce du troisième projectile de référence de cette arme. Alors que  $F2-68-F2$  et  $PSC-68$  représentent respectivement le numéro de dossier et le numéro de pièce du deuxième projectile de test de l'arme numéro 68.

Le résultat de corrélation d'un projectile avec la base de données est retourné sous la forme d'une liste ordonnée, de plusieurs lignes, répartie sur trois parties. La première, composée d'une cellule, comporte le rang du projectile de test. La deuxième partie est composée de quatre cellules à savoir le numéro de dossier, le numéro de pièce, le calibre et l'identifiant de la station d'acquisition du projectile de test. La troisième partie est composée de cinq cellules réservées pour les résultats de corrélation selon les cinq scores suivants :

- *Phase Max* : la plus grande phase obtenue lors de la comparaison entre les projectiles A et B saisis en 2D.
- *Phase de pointe* : le plus grand score entre deux impressions de champs dans le *Phase Max* .
- *LEA Max* : le plus grand score obtenu dans la comparaison entre deux impressions de champs saisis en 2D.
- *LEA Max 3D* : le plus grand score obtenu dans la comparaison entre deux impressions de champs saisis en 3D.
- *Phase Max 3D* : la plus grande phase obtenue lors de la comparaison entre deux projectiles A et B saisis en 3D.

La figure 31 représente une partie de la liste de corrélation entre le premier projectile de test tiré par l'arme numéro 37 et la base de données.

### Dossier de référence

**Numéro de dossier :** F-37-F  
**Nom du site :** BUX1-INCGN  
**Organisme d'origine :** W-15  
**Type d'événement :** Autre  
**Commentaires :**

### Pièce de référence

**Numéro de la pièce :** PSC-37  
**Calibre :** 7.62 x 39 mm - 7.62 x 39 mm  
**Dernière acq. par :** lahcen elfekair  
**Type d'événement :** Autre  
**Commentaires :**

**Date de création de la requête :** 7/12/2018 2:52:32 PM

**Taille totale de l'échantillon:** 800

**Classifié par :** Résultats 3D Phase max.

	Pièce test				Résultats 2D			Résultats 3D	
	Dossier	Pièce	Calibre	Site	LEA max	Phase de pointe	Phase max	LEA max	Phase max
1	AA107	A107-TEP3	7.62 x 39 mm	BUX1-INCGN	167	149	1355	28	172
2	AA140	A140-TEP3	7.62 x 39 mm	BUX1-INCGN	129	129	580	26	157
2	AA112	A112-TEP1	7.62 x 39 mm	BUX1-INCGN	0	0	0	24	157
2	AA40	A40-TEP3	7.62 x 39 mm	BUX1-INCGN	178	171	1447	23	157
2	AA36	A36-TEP2	7.62 x 39 mm	BUX1-INCGN	202	202	1450	22	157
2	AA34	A34-TEP3	7.62 x 39 mm	BUX1-INCGN	202	202	1720	27	157
3	AA90	A90-TEP2	7.62 x 39 mm	BUX1-INCGN	150	150	1352	18	155
3	AA46	A46-TEP2	7.62 x 39 mm	BUX1-INCGN	170	170	1495	18	155
4	AA90	A90-TEP3	7.62 x 39 mm	BUX1-INCGN	156	156	1300	20	152
4	AA89	A89-TEP1	7.62 x 39 mm	BUX1-INCGN	160	160	1325	18	152
4	AA6	A6-TEP2	7.62 x 39 mm	BUX1-INCGN	149	135	925	18	152
5	AA77	A77-TEP3	7.62 x 39 mm	BUX1-INCGN	189	161	1417	21	150
6	AA190	A190-TEP1	7.62 x 39 mm	BUX1-INCGN	161	129	610	18	147
6	AA134	A134-TEP3	7.62 x 39 mm	BUX1-INCGN	0	0	0	24	147
6	AA108	A108-TEP3	7.62 x 39 mm	BUX1-INCGN	133	133	830	20	147
6	AA5	A5-TEP1	7.62 x 39 mm	BUX1-INCGN	171	171	1442	17	147
7	AA185	A185-TEP1	7.62 x 39 mm	BUX1-INCGN	0	0	0	19	145
7	AA98	A98-TEP2	7.62 x 39 mm	BUX1-INCGN	159	154	1397	20	145
7	AA69	A69-TEP1	7.62 x 39 mm	BUX1-INCGN	160	149	1425	18	145
7	AA39	A39-TEP2	7.62 x 39 mm	BUX1-INCGN	144	144	1352	20	145
7	AA37	A37-TEP4	7.62 x 39 mm	BUX1-INCGN	173	166	1557	27	145
8	AA79	A79-TEP1	7.62 x 39 mm	BUX1-INCGN	167	167	1455	18	142
8	AA76	A76-TEP3	7.62 x 39 mm	BUX1-INCGN	166	162	1502	18	142
8	AA30	A30-TEP2	7.62 x 39 mm	BUX1-INCGN	0	0	0	20	142
8	AA23	A23-TEP2	7.62 x 39 mm	BUX1-INCGN	186	186	1520	25	142
9	AA180	A180-TEP4	7.62 x 39 mm	BUX1-INCGN	164	138	585	21	140
9	AA146	A146-TEP2	7.62 x 39 mm	BUX1-INCGN	177	150	1412	22	140
9	AA113	A113-TEP1	7.62 x 39 mm	BUX1-INCGN	119	119	297	23	140
9	AA107	A107-TEP2	7.62 x 39 mm	BUX1-INCGN	168	168	1372	24	140
9	AA105	A105-TEP2	7.62 x 39 mm	BUX1-INCGN	191	162	767	21	140
0	AA08	A08-TEP3	7.62 x 39 mm	BUX1-INCGN	178	153	1450	18	140

Figure 31: Exemple de résultats de corrélation IBIS pour le premier projectile de test de l'arme 37

Au total, trois cent quarante fichiers (200 pour le premier projectile de test et 140 pour le deuxième) de format *XPS* « *XML Paper Specification* » ont été récupérés.

Il est important de noter que théoriquement, chaque liste de corrélation peut être composée de 800 lignes (4 projectiles x 200 armes), dont chaque ligne comprend les cinq scores de corrélation du projectile de test avec un projectile de référence d'une arme donnée. Mais, pour des raisons non expliquées dans le manuel d'exploitation du système *IBIS TRAX3D*, toutes les listes de corrélation ont moins de 800 lignes.

Afin d'exploiter les listes de corrélation dans *RStudio*, chaque fichier *XPS* a été converti et sauvegardé, à l'aide du logiciel *ABBYY FineReader PDF 12*, au format *XLS*, puis sauvegardé au format *CSV*.

Les 340 fichiers de corrélation ont été importés dans R avec le logiciel IDE *RStudio* (RStudio Team 2022) couplé à la suite *Tidyverse* (Wickham, n.d.).

### 8.1.3 Le système BULLETEXT développé dans cette recherche

Afin de faciliter la lecture des résultats dans les tableaux et graphiques qui suivront, Le nom *BulleText* a été choisi, et il est issu de la combinaison de *Bullet* et *Texture*. Il sera utilisé pour décrire la méthode basée sur l'analyse de la texture proposée dans cette recherche.

**8.1.3.1 Choix des techniques d'apprentissage utilisées par *BulleText*** Comme indiqué précédemment, deux scénarios investigatifs vont être testés dans le cadre de cette recherche, à savoir le scénario *projectile-projectile* et le scénario *projectile-arme*. Dans ce contexte, plusieurs techniques d'apprentissage supervisé couramment utilisées en *machine learning* ont été utilisées.

Pour le scénario *projectile-projectile*, le soussigné n'a trouvé que la technique *SVM* «*Support Vector Machine*» qui permet d'effectuer l'apprentissage supervisé avec un seul échantillon.<sup>29</sup>

Une réduction de dimensionnalité de 7920 à 500 variables, par une analyse en composante principale *PCA* (*Principal Component Analysis*), a été effectuée. Comme attendu, la précision du système augmente en fonction de l'augmentation du nombre de composantes principales (figure 32). À partir de 500 variables, un plateau est atteint en termes de précision. Cette réduction de dimensionnalité par *PCA* permet de garder les variables qui expliquent le 95% de la variabilité de la signature balistique, que ce soit pour les impressions de champs seules ou le projectile dans son entier (considérant les 4 champs).

---

<sup>29</sup>Deux autres versions plus évoluées de la technique *SVM*, à savoir *i-Vector* (Dehak et al. 2009) et *X-Vector* (Snyder et al. 2018), utilisées en reconnaissance de locuteurs, n'ont pas été testées dans ce travail de recherche. Il va de soit que les choix retenus ici peuvent être révisés à la faveur des développements des techniques de *machine learning*.

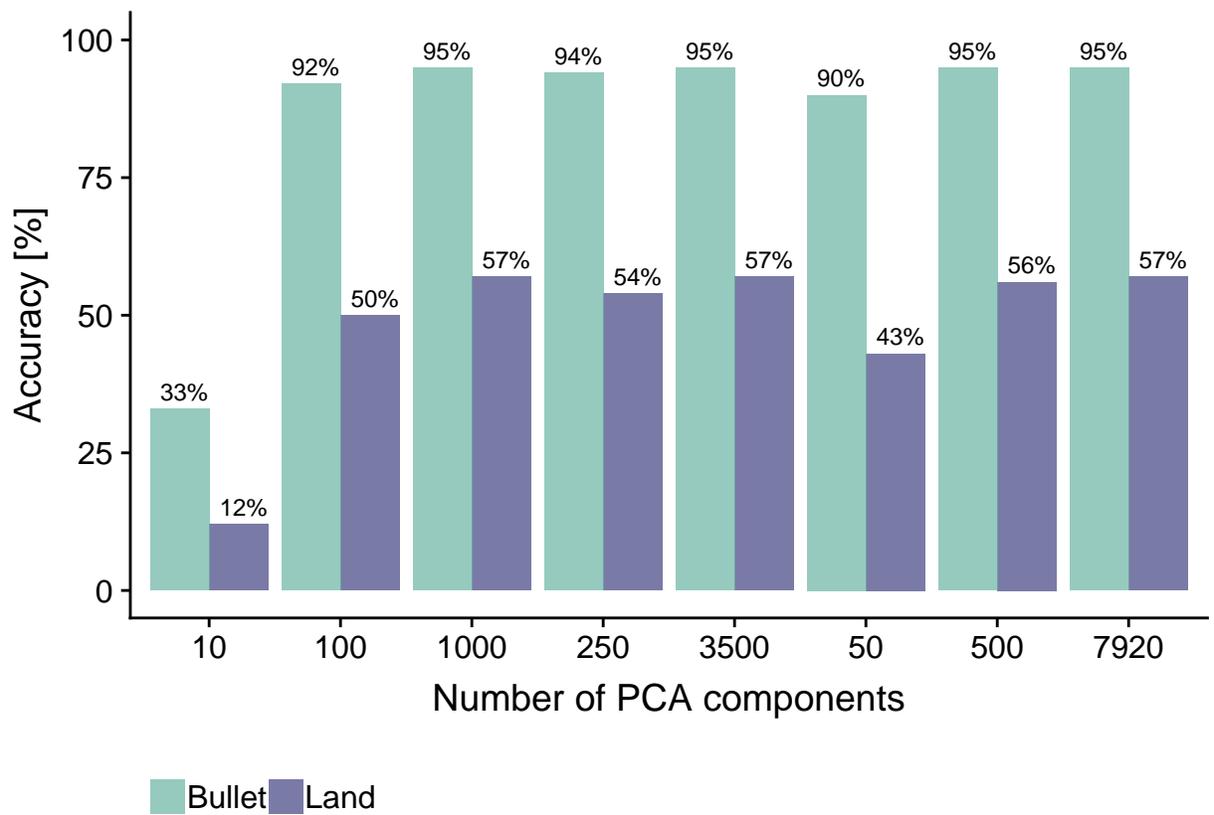


Figure 32: Performance en terme de précision obtenue par SVM en fonction du nombre de composantes principales retenues par PCA, dans le scénario *projectile-projectile*

Pour le scénario *projectile-arme*, et afin de choisir la technique la plus performante pour la présente recherche, dix techniques d'apprentissage supervisé ont été testées sur une base de données de cent-trente armes. Il s'agit de *Random Forest*, *Decision Trees*, *K Nearest Neighbor*, *Mixture Discriminant Analysis*, *Regularized Discriminant Analysis*, *Linear Discriminant Analysis*, *Naïve Bayes*, *eXtreme Gradient Boosting* et *Support Vector Machine*, techniques couplées avec une réduction de dimensionnalité par PCA. La technique *RDA* (*Regularized Discriminant Analysis*) couplée avec une *PCA* retenant 100 composantes, a été choisie (figure 33), car elle minimise le taux d'erreur. Ce choix s'impose quel que soit le nombre de composantes principales retenues. La valeur de 100 composantes a été sélectionnée comme le meilleur compromis entre dimensionnalité et performance.

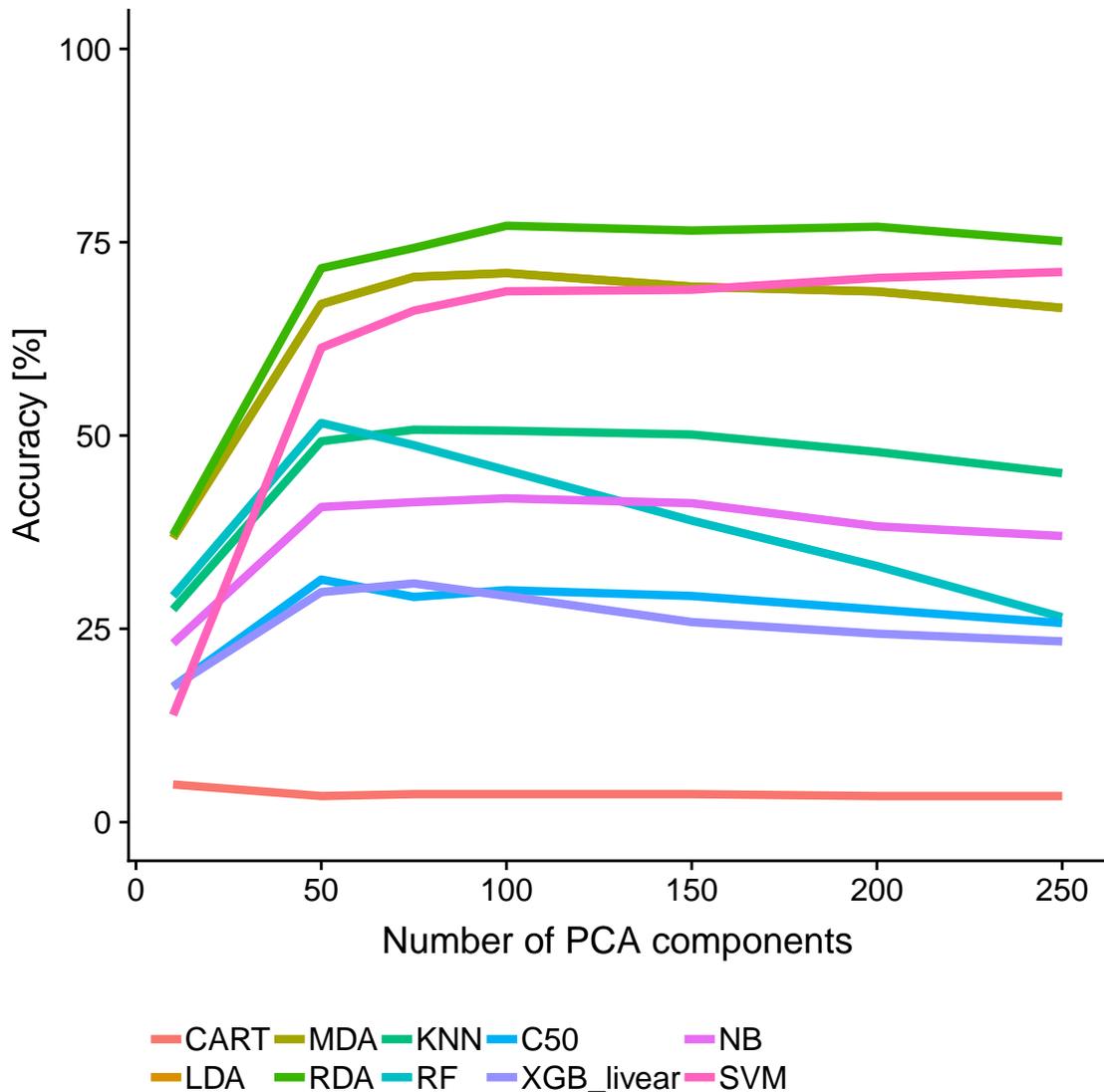


Figure 33: Performances en termes de précision des techniques couplées avec différentes PCA, obtenues sur base de données de 130 armes.

## 8.2 Résultats pour chaque système en mode investigatif

### 8.2.1 Scénario *projectile-projectile*

Il est utile de préciser que pour le système **BulleText**, le calcul du score de corrélation d'un projectile de test avec une arme saisie dans la base de données, est le score de la phase qui maximise la somme des scores obtenus pour les signatures des impressions de champs de ce projectile avec les modèles des impressions de champs de cette arme. La figure (figure 34) rappelle comment est conduite la recherche dans une base de données (limitée à 3 armes à des fins d'illustration sur la figure). Plus spécifiquement, pour chaque projectile (FA\_x) en base, l'extraction des caractéristiques des images obtenues de chaque champ permet de construire les modèles de chacun d'entre eux par l'application de la *PCA* et de *SVM*. Ces modèles de chaque champ constituent la base de données (4 modèles de champ par arme). Lors d'une requête dans la base, les caractéristiques de chaque champ du projectile de question (X) sont extraites et leurs scores de prédictions sont obtenus par le modèle *SVM* pour chaque arme en base de données. Puis la somme des valeurs est obtenue pour chaque phase possible entre les projectiles, correspondant à chaque alignement possible entre les deux éléments de munition. Le score final pour chaque arme est obtenu en sélectionnant la valeur de la phase donnant la somme maximale. C'est ce score qui est exploité pour trier les armes candidates en base de données.

Dans les résultats, nous présenterons, dans un premier temps, les performances en termes de précision à la position 1 des rangs, triés selon les scores de chaque système. Lorsque l'arme correspondante est retournée en position 1, le rapprochement correct est comptabilisé comme un succès, sinon le cas n'est pas comptabilisé.

Dans un deuxième temps, nous présenterons les courbes *CMC* (*Cumulative Matching Characteristics*) obtenues en comptant les cumuls des rapprochements obtenus du rang 1 au rang x considéré. Cela permet de se projeter dans l'exploitation des systèmes où un-e opérateur(-trice) sera invité-e à contrôler une liste de x armes et pas uniquement le premier candidat. Les courbes *CMC* sont présentées du rang 1 au rang 200 (la taille de la base de données). La valeur au rang 1 correspond à la précision obtenue au rang 1, puis graduellement la probabilité d'observer un rapprochement sur l'arme cible va augmenter jusqu'à 100% lorsque toute la base est prise en compte dans la liste retournée.

Au total, il existe trente ( $6 \times 5$ ) cas possibles pour le scénario *projectile-projectile*. Toutefois, étant donné que le système **IBIS TRAX3D**, contrairement au **EVOFINDER** et **BulleText**, ne donne pas la possibilité d'effectuer des comparaisons entre les projectiles de référence de la même arme, il ne reste que huit cas communs entre **IBIS TRAX3D**, **EVOFINDER** et **BulleText**, à savoir *5VS1*, *5VS2*, *5VS3*, *5VS4*, *6VS1*, *6VS2*, *6VS3* et *6VS4*.

Il est utile préciser que dans le reste du manuscrit le terme *précision du rapprochement* signifie le pourcentage des armes classées correctement aux  $n$  premiers rangs des listes de rapprochement générées.

Les résultats des rapprochements pour ces derniers cas, obtenus par les trois systèmes sont présentés dans le tableau 6.

EVO\_22 et EVO\_50 font respectivement référence aux mesures effectuées sur les projectives (0.22 et 0.50 mm), la valeur (x) de chaque colonne IBIS\_x indique le score considéré issu du système IBIS (*Phase Max*, *Phase de pointe*, *LEA Max*, *LEA Max 3D*, *Phase Max 3D*). La précision obtenue avec le système **EVOFINDER** est meilleure en suivant les instructions du fabricant pour la taille de la fenêtre d'analyse (50 mm). Pour le système **IBIS TRAX3D**, sans surprise, le score le plus efficace en 2D est *LEA Max* alors qu'en analyse 3D, le score *Phase Max 3D* offre les meilleures performances. En comparant les trois systèmes testés, **BulleText** est le plus performant, quelque soit les transactions effectuées (entre 71% et 99% de précision au premier rang).

le tableau 7 présente la comparaison des résultats des rapprochements obtenus respectivement par **EVOFINDER** et **BulleText**, dans les vingt-deux autres cas restants, à savoir *2VS1*, *3VS1*, *4VS1*, *1VS2*, *3VS2*, *4VS2*, *1VS3*, *2VS3*, *4VS3*, *1VS4*, *2VS4*, *3VS4*, *1VS5*, *2VS5*, *4VS5*, *6VS5*, *1VS6*, *2VS6*, *3VS6*, *4VS6* et *5VS6*.

Les résultats vont dans le même sens que précédemment. Les annotations sur le système **EVOFINDER** conformément aux instructions du fabricant sont plus performantes, mais le système **BulleText** est nettement plus efficace, quelle que soit la transaction considérée (de 66% à 99% de précision au premier rang).

La figure 35 représente les courbes *CMC* (*Cumulative Matching Characteristics*) obtenues, par **EVOFINDER**, **IBIS TRAX3D** et **BulleText**, pour le cas *6VS3* (le projectile de référence est le troisième projectile, et le projectile de test est le sixième projectile). Les courbes *CMC* des vingt-neuf autres cas, du scénario *projectile-projectile*, sont jointes en annexe A1. Les annotations sur chaque graphe spécifient deux points de performance, la précision au rang 1 et la précision cumulée obtenue au rang 10. Le système **BulleText** présente des performances sur les courbes *CMC* qui dépassent largement les deux autres systèmes.

**8.2.1.1 Analyse des cas de faux rapprochements du système *BulleText*** Le tableau 8 présente les douze faux rapprochements (et donc une absence de détection de la bonne arme au rang 1) par le système *BulleText* pour le cas *6VS3*. Les tableaux correspondant aux autres vingt-neuf cas sont présentés dans l'annexe A3. Dans une approche investigative, il n'y a pas que le premier rang qui a de l'intérêt mais tous les candidats d'une courte liste peuvent être considérés par un examinateur (par exemple les 10 ou 20 premiers de la liste en fonction des ressources disponibles). Dans cet esprit, les courbes *CMC* permettent d'apprécier les performances de la solution développée sur une large gamme de rangs.

Pour le cas *6VS3*, le tableau indique dans la première colonne le numéro de l'arme prédite faussement par le système. La deuxième colonne donne le numéro de l'arme correcte correspondante au projectile de question et la troisième donne le rang à laquelle elle a été observée. L'examen des rangs rend bien compte de l'efficacité du système, car, dans la grande majorité des cas, les bons rapprochements sont dans les 10 premiers rangs. Pour un seul cas seulement, le projectile correspondant est retourné en position 41.

Les figures (36, 37, 38 et 39) illustrent des cas où le système *BulleText* a proposé de faux rapprochements au rang 1.

Ces illustrations permettent d'apprécier visuellement les associations fortuites proposées et d'effectuer une comparaison directe avec la bonne source.

**8.2.1.2 Influence de la taille de la base de données** Afin d'évaluer l'influence de la taille de la base de données sur le pouvoir discriminatoire du système *BulleText*, la précision de la méthode a été calculée en fonction de l'augmentation de la taille de la base de données. La figure 40 montre cette évolution pour le cas d'apprentissage effectué par le troisième projectile, et le test avec les autres cinq projectiles. Comme attendu, la précision diminue en fonction de l'augmentation de la taille de la base de données. Cette diminution est plus importante lorsque le test est effectué avec le premier projectile tiré (comme il sera discuté plus tard, ce projectile est le plus froid par rapport aux autres). À noter que la courbe s'interrompt pour le projectile 6 à une taille de la base de 140, car ce sixième projectile n'était pas disponible pour toutes les armes dans la base.

L'évolution de la précision de la méthode en fonction de la taille de la base de données pour les autres cinq cas (*allVS1*, *allVS2*, *allVS4*, *allVS5* et *allVS6*), sont documentés dans l'annexe A2.

**8.2.1.2.1 Cas de projectile exploitable fortement endommagé** Le tableau 9 synthétise les résultats obtenus, pour les trente cas de la configuration d'apprentissage par un projectile, en matière de bon classement en première position, et parmi les dix premières positions de la liste de rapprochement issue de la discrimination par la solution *BulleText*.

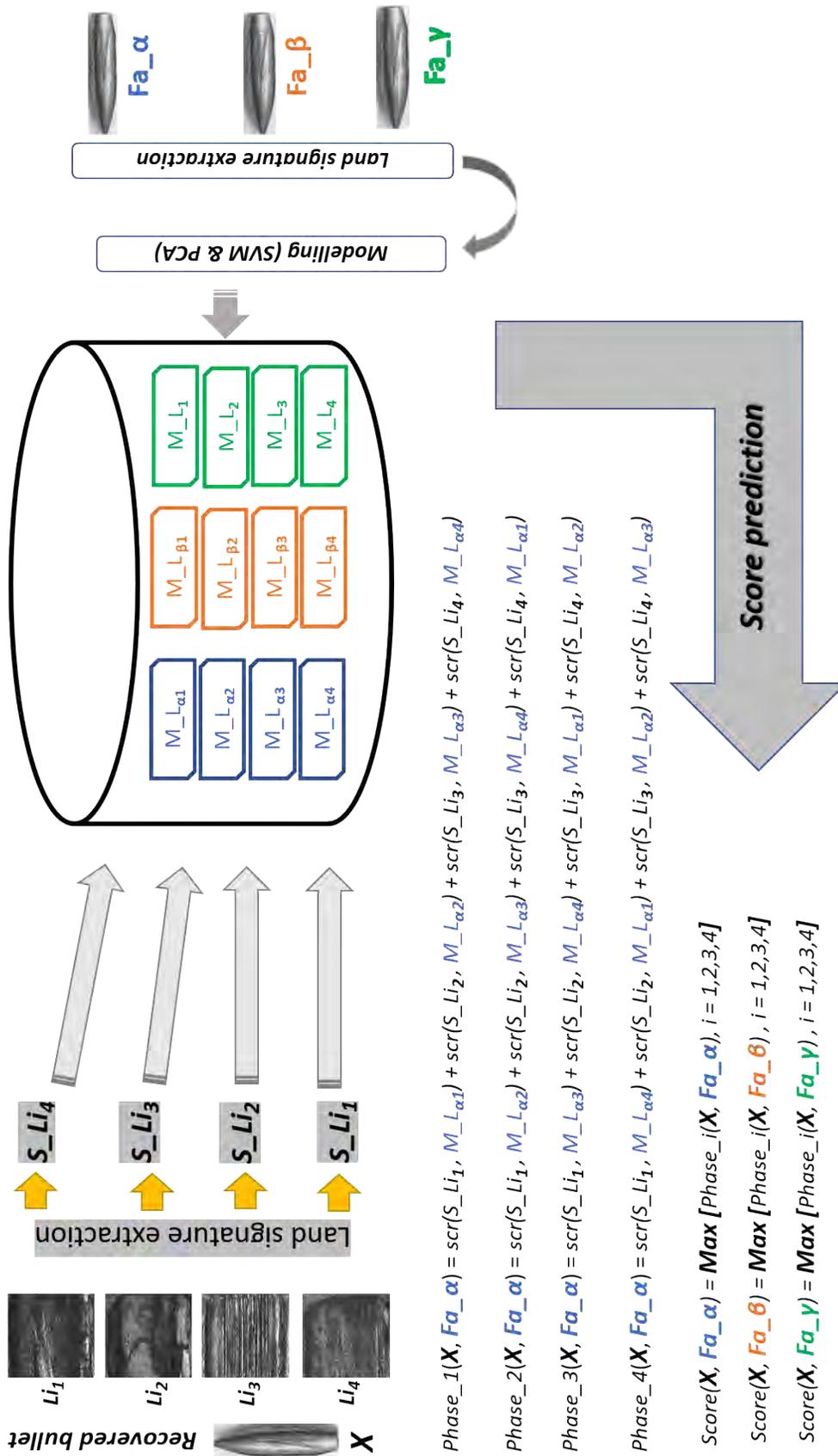


Figure 34: Illustration de la méthode de calcul des scores du système *BulleText* pour le scénario *projectile-projectile* avec une base de données (limitées à trois projectiles à des fins illustratives)

Table 6: Résultats de discrimination obtenus par le système *EVOFINDER*, *IBIS TRAX3D* et *BulleText* pour le scénario projectile-projectile\*.

	EVO_22	EVO_50	IBIS_1	IBIS_2	IBIS_3	IBIS_4	IBIS_5	BulleText
5VS1	0.12	0.18	0.08	0.08	0.10	0.44	0.50	0.76
5VS2	0.22	0.24	0.07	0.07	0.14	0.44	0.57	0.90
5VS3	0.26	0.31	0.10	0.11	0.15	0.57	0.69	0.96
5VS4	0.26	0.37	0.11	0.12	0.23	0.64	0.72	0.98
6VS1	0.20	0.14	0.05	0.05	0.06	0.36	0.42	0.71
6VS2	0.23	0.26	0.05	0.05	0.11	0.44	0.47	0.79
6VS3	0.22	0.29	0.08	0.11	0.09	0.55	0.61	0.91
6VS4	0.29	0.31	0.09	0.10	0.16	0.58	0.67	0.99

Table 7: Résultats de discrimination obtenus par: *EVOFINDER* et *BulleText* pour le scénario *projectile-projectile*

	EVOFINDER_22	EVOFINDER_50	BulleText
2VS1	0.18	0.24	0.87
3VS1	0.14	0.20	0.76
4VS1	0.14	0.19	0.78
1VS2	0.18	0.24	0.86
3VS2	0.32	0.39	0.95
4VS2	0.27	0.35	0.93
1VS3	0.15	0.20	0.78
2VS3	0.30	0.38	0.97
4VS3	0.32	0.42	0.99
1VS4	0.14	0.17	0.75
2VS4	0.26	0.34	0.92
3VS4	0.32	0.44	0.98
1VS5	0.14	0.17	0.72
2VS5	0.23	0.25	0.90
3VS5	0.28	0.30	0.95
4VS5	0.26	0.38	0.98
6VS5	0.36	0.46	0.99
1VS6	0.20	0.15	0.69
2VS6	0.26	0.24	0.83
3VS6	0.24	0.33	0.94
4VS6	0.27	0.32	0.97
5VS6	0.40	0.45	0.99

Table 8: Faux rapprochements générés par *BulleText* pour le cas *6VS3* *projectile-projectile*

Predicted bullet	Correct bullet	Rank
79	86	4
129	106	2
124	126	4
181	130	2
99	136	8
47	137	2
191	138	8
130	156	3
83	164	41
66	165	2
137	166	2
179	196	2

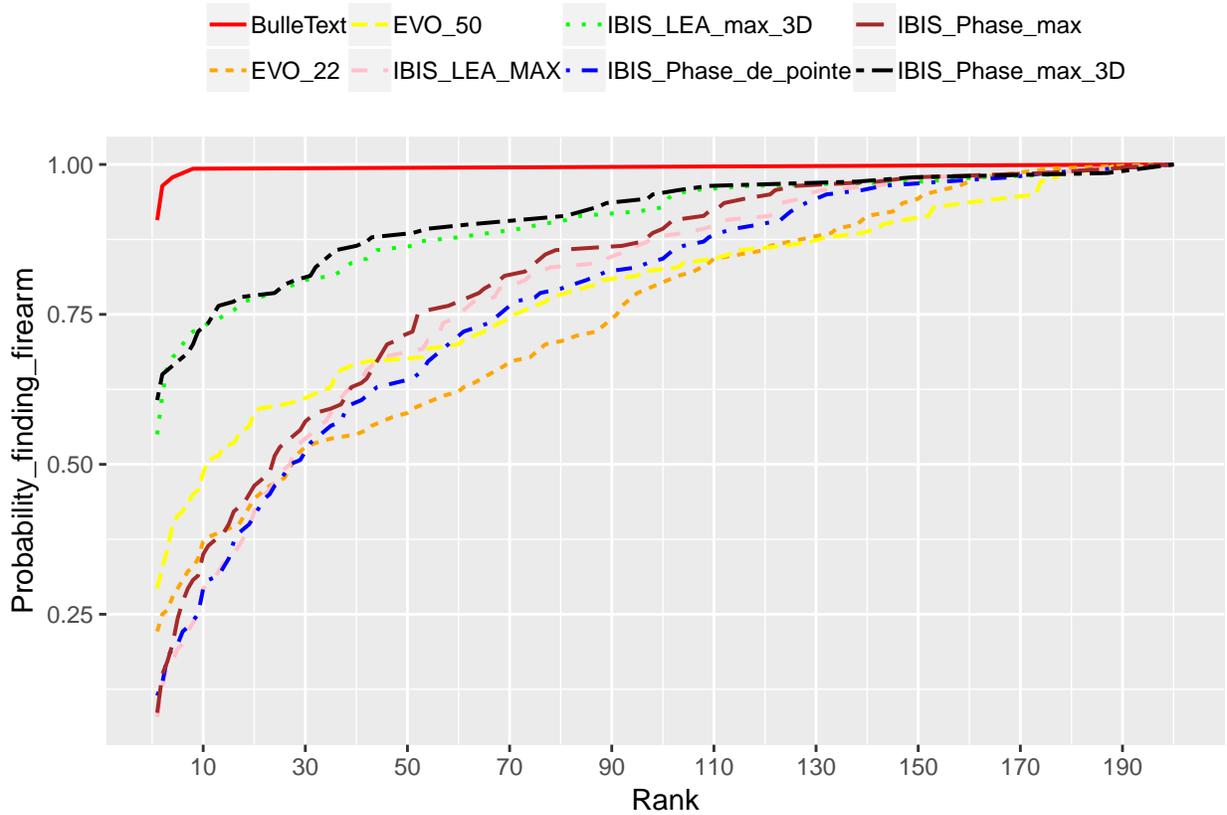


Figure 35: Courbes *CMC* obtenues par les systèmes *EVOFINDER* (deux variantes), *IBIS TRAX3D* (cinq variantes) et *BulleText* dans le cas *6VS3*. Taille de la base de données : 200 AKM47

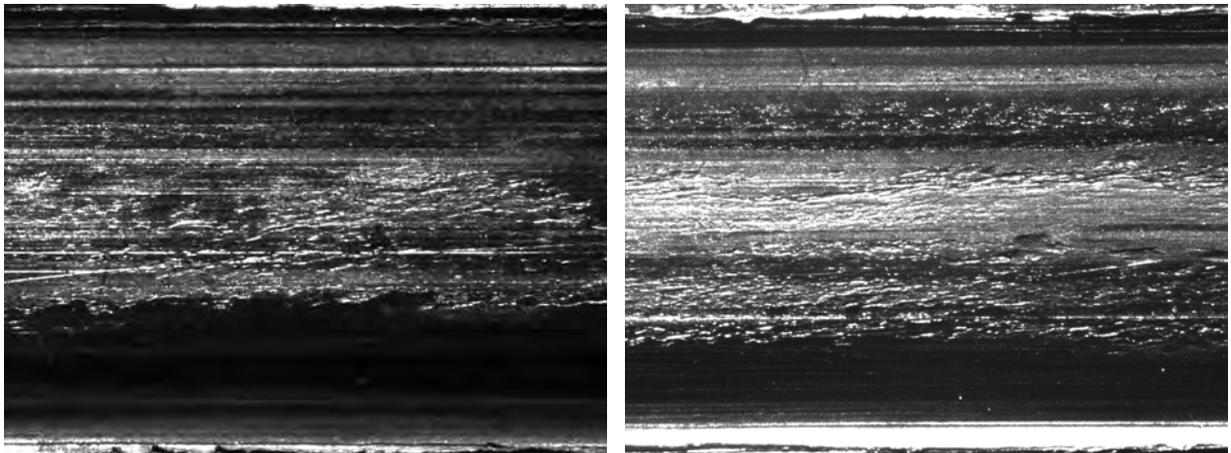
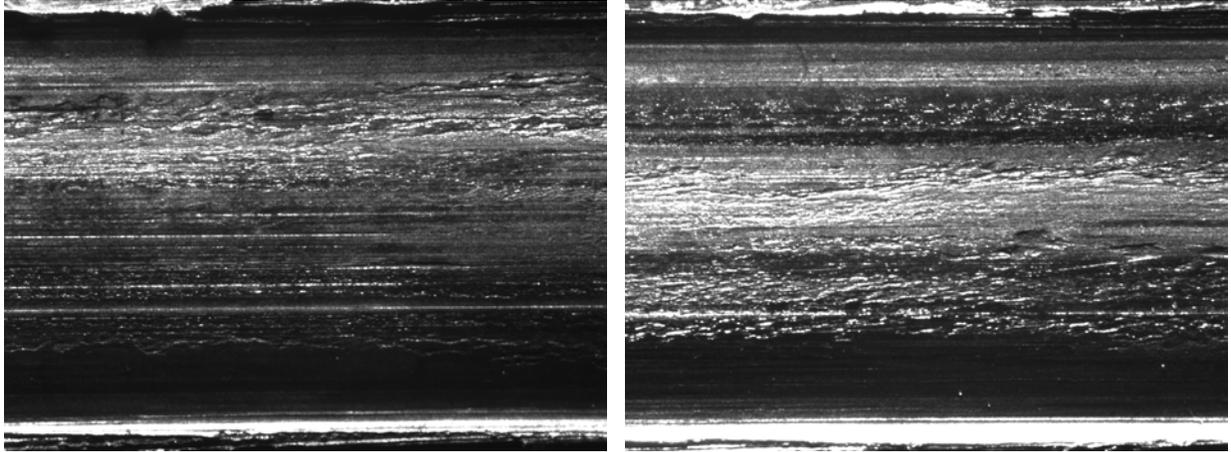


Figure 36: Configuration: *6VS3*. En haut: fausse exclusion dans le champ  $n^{\circ}2$  des projectiles *6* (à droite) et *3* (à gauche) de l'arme *106*. En bas: faux rapprochement entre le champ  $n^{\circ}2$  du projectile de test de l'arme *106* (à droite) et le champ  $n^{\circ}3$  du projectile de référence de l'arme *129* (à gauche).

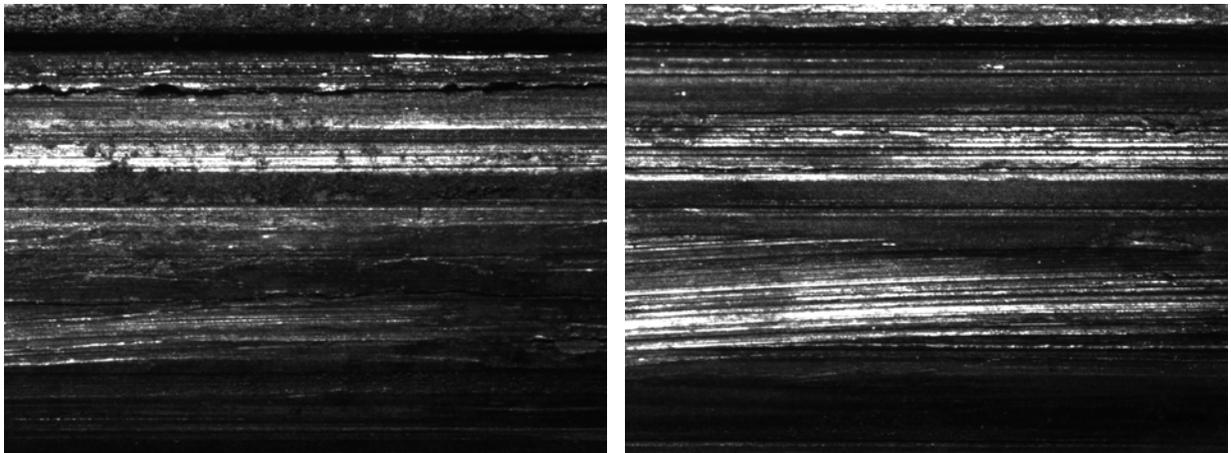
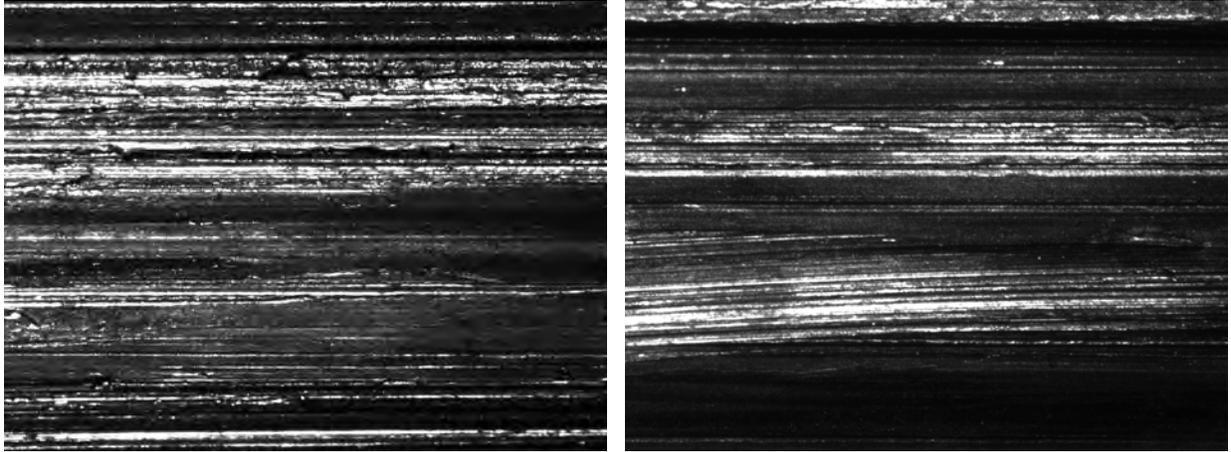


Figure 37: Configuration: *6VS3*. En haut: fausse exclusion dans le champ  $n^{\circ}4$  des projectiles *6* (à droite) et *3* (à gauche) de l'arme *126*. En bas: faux rapprochement entre le champ  $n^{\circ}4$  du projectile de test de l'arme *126* (à droite) et le champ  $n^{\circ}4$  du projectile de référence de l'arme *124* (à gauche).

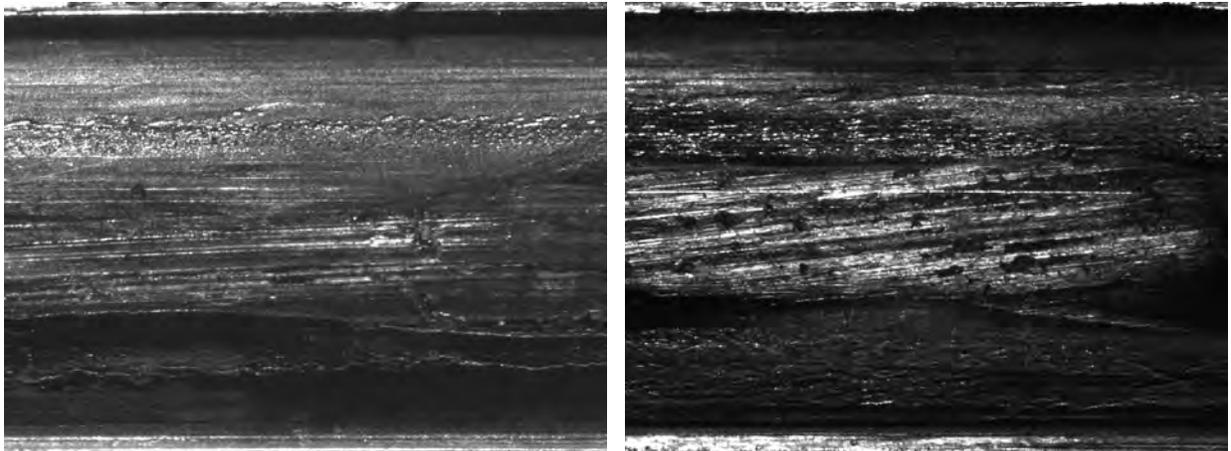
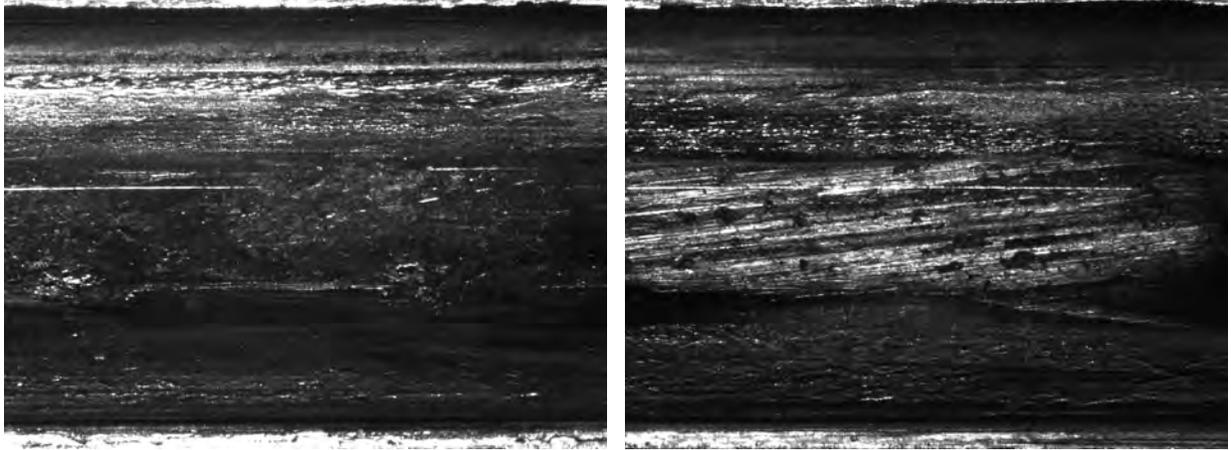


Figure 38: Configuration: *6VS3*. En haut: fausse exclusion dans le champ  $n^{\circ}1$  des projectiles *6* (à droite) et *3* (à gauche) de l'arme *130*. En bas: faux rapprochement entre le champ  $n^{\circ}1$  du projectile de test de l'arme *130* (à droite) et le champ  $n^{\circ}4$  du projectile de référence de l'arme *181* (à gauche).

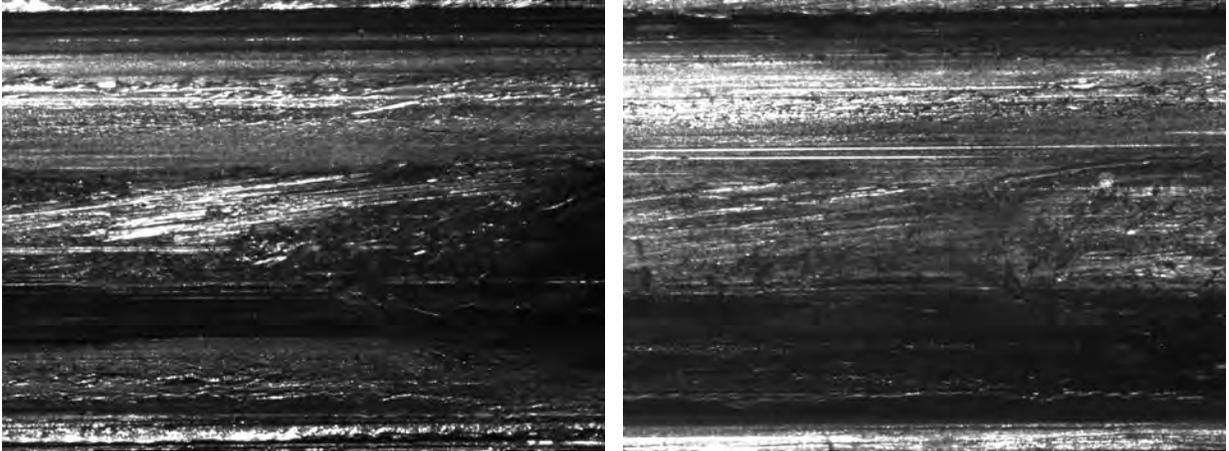
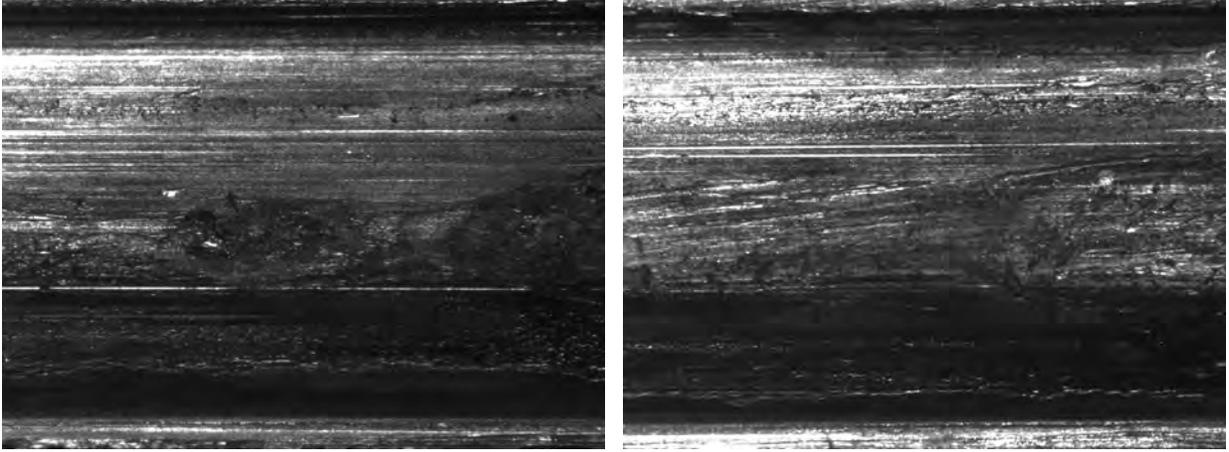


Figure 39: Configuration: *6VS3*. En haut: fausse exclusion dans le champ  $n^{\circ}2$  des projectiles *6* (à droite) et *3* (à gauche) de l'arme *156*. En bas: faux rapprochement entre le champ  $n^{\circ}2$  du projectile de test de l'arme *156* (à droite) et le champ  $n^{\circ}4$  du projectile de référence de l'arme *130* (à gauche).

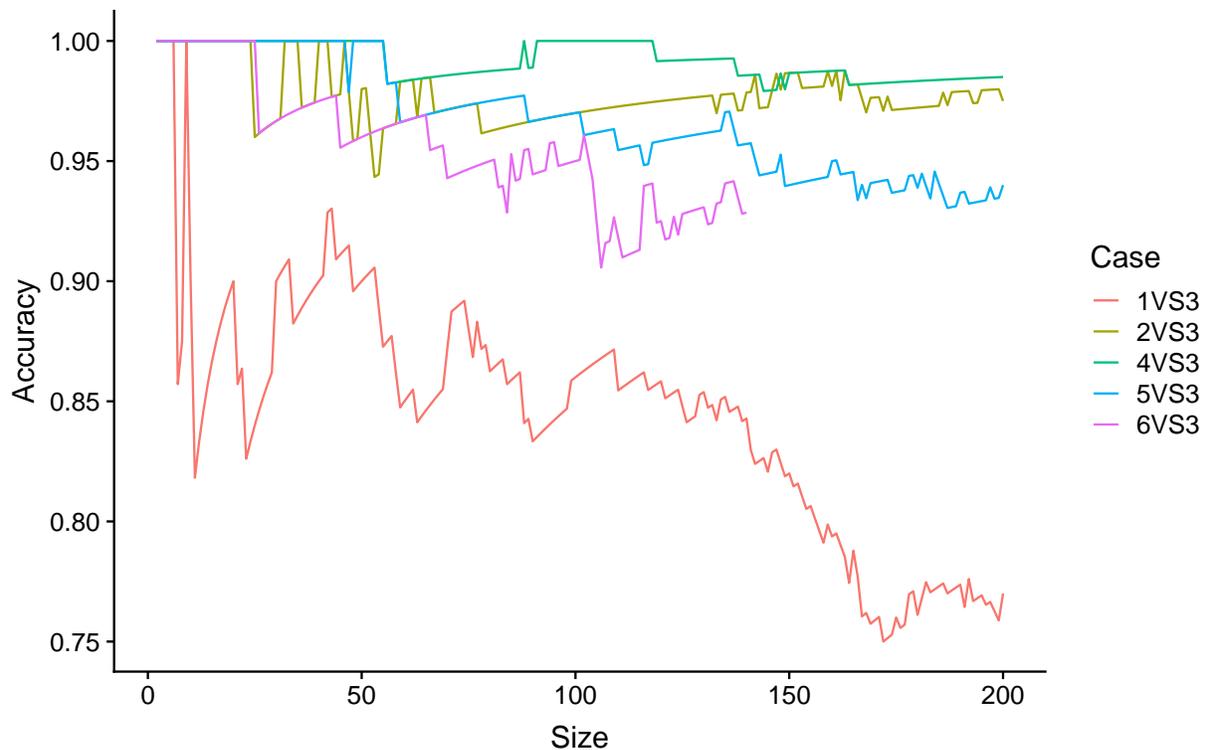


Figure 40: Configuration: *allVS3*. Évolution de la précision du système *BulleText* en fonction de la taille de la base de données.

Table 9: Résultats de la précision des rapprochements au premier rang et parmi le TOP-10 réalisés par la solution *BulleText* avec un apprentissage exploitant un projectile. Taille de la base de données : 800 champs de 200 AKM47

	first_position	top_10
2VS1	0.37	0.65
3VS1	0.32	0.56
4VS1	0.30	0.55
5VS1	0.26	0.53
6VS1	0.25	0.49
1VS2	0.37	0.64
3VS2	0.57	0.79
4VS2	0.49	0.73
5VS2	0.45	0.69
6VS2	0.39	0.64
1VS3	0.32	0.57
2VS3	0.57	0.80
4VS3	0.62	0.82
5VS3	0.56	0.78
6VS3	0.52	0.74
1VS4	0.29	0.54
2VS4	0.50	0.74
3VS4	0.61	0.81
5VS4	0.61	0.82

---

	first_position	top_10
6VS4	0.55	0.78
1VS5	0.28	0.54
2VS5	0.44	0.68
3VS5	0.57	0.78
4VS5	0.62	0.81
6VS5	0.62	0.83
1VS6	0.27	0.53
2VS6	0.40	0.66
3VS6	0.54	0.75
4VS6	0.55	0.79
5VS6	0.65	0.83

---

### 8.2.2 Scénario *projectile-arme*

Pour ce scénario, quatre configurations d'apprentissage automatique ont été envisagées, à savoir, un apprentissage automatique basé sur deux, trois, quatre ou cinq projectiles de référence. La technique de prédiction utilisée est basée sur la *PCA/RDA*.

Comme précédemment, pour une transaction donnée, c'est la valeur de probabilité normalisée dont la somme est maximisée selon la phase qui est retenue. La figure (41) représente le processus.

La technique *RDA* offre en sortie de prédiction une probabilité *a posteriori* qui indique la probabilité prédite que l'arme soit à la source du projectile testé contre la base de données. Sur cette base, et en prévision de la partie évaluative de cette recherche, il est aisé de calculer le rapport de vraisemblance (*LR*) associé à chaque transaction en divisant les chances obtenues *a posteriori* par les chances *a priori* (équivalentes pour chaque arme et proportionnelles au nombre d'armes dans la base de données). Cette valeur de *LR* prédite sera exploitée dans la présentation des résultats qui suivent.

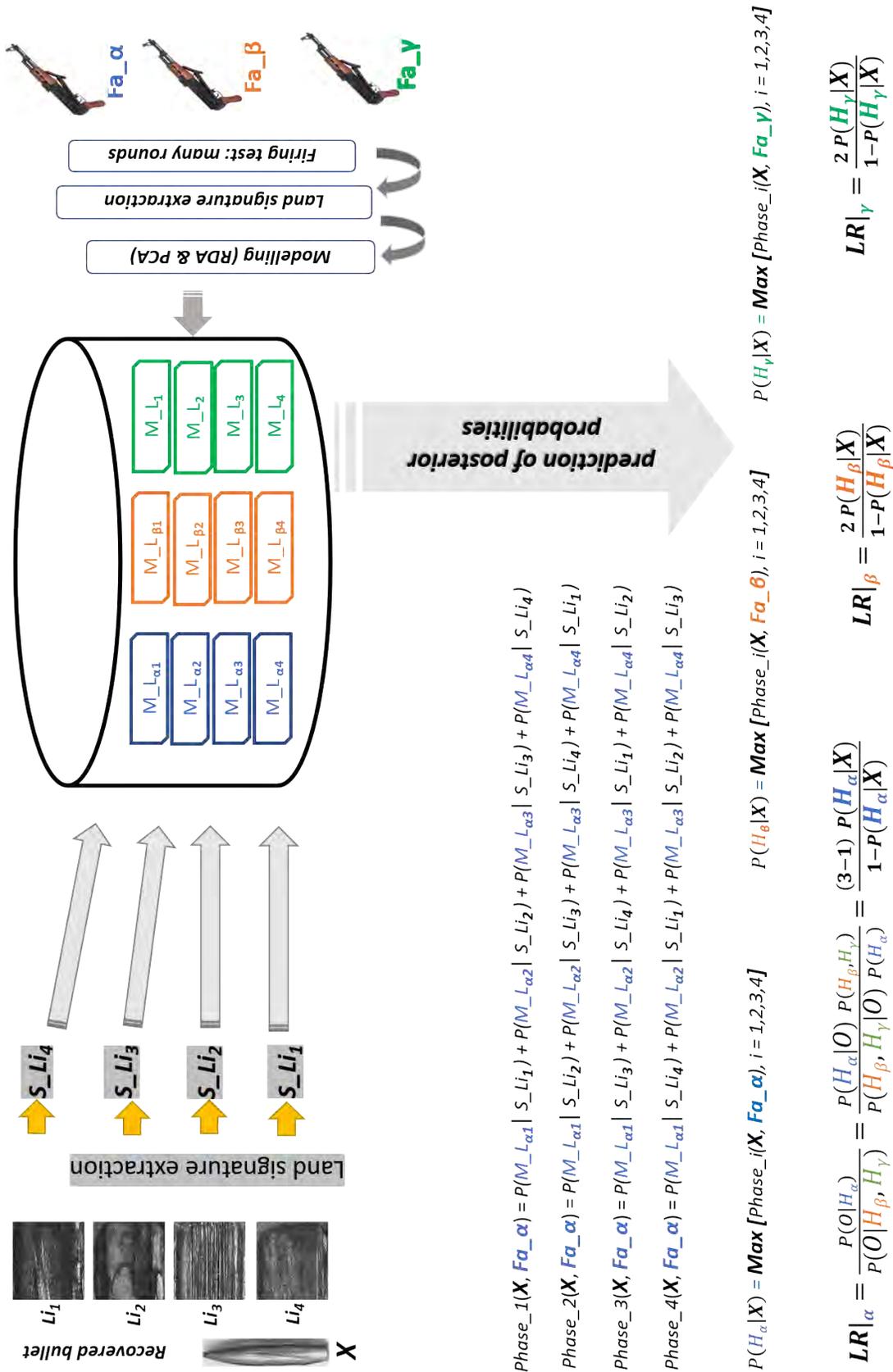


Figure 41: Calcul des rapports de vraisemblances du système *BulleText* pour le scénario *projectile-arme*

**8.2.2.1 Apprentissage avec deux projectiles** Au total, il existe vingt ( $5 \times 4$ ) cas possibles pour cette configuration. Mais, étant donné que le système *IBIS TRAX3D*, contrairement aux systèmes *EVOFINDER* et *BulleText*, ne donne pas la possibilité d'effectuer des comparaisons entre les projectiles de référence de la même arme, il ne reste que six cas communs entre les systèmes, à savoir *5VS12*, *5VS23*, *5VS34*, *6VS12*, *6VS23*, et *6VS34*.

Les résultats des rapprochements au rang 1 pour ces derniers cas sont présentés dans le tableau 10. Comme observé pour la recherche projectile-projectile, le système *BulleText* offre des performances supérieures aux deux autres (avec une précision au rang 1 entre 66% et 94%). Le système *IBIS TRAX3D* se détache clairement du système *EVOFINDER*. Dans sa version 3D, *IBIS TRAX3D* est proche de *BulleText* (qui n'exploite que la texture en 2D), alors qu'en 2D, *IBIS TRAX3D* (*IBIS\_3*) reste au même niveau de performance que *EVOFINDER*.

Le tableau 11 donne la comparaison des résultats de discrimination entre *EVOFINDER* et *BulleText*, pour les autres quatorze cas, à savoir *3VS12*, *4VS12*, *1VS23*, *4VS23*, *1VS34*, *2VS34*, *1VS45*, *2VS45*, *3VS45*, *6VS45*, *1VS56*, *2VS56*, *3VS56*, et *4VS56*.

La comparaison ici n'apporte pas de surprise: *BulleText* est bien plus performant en rang 1 (précision entre 42% et 94% selon la configuration) que *EVOFINDER* (entre 20% et 49%).

La figure 45 présente les courbes *CMC* obtenues, par *EVOFINDER*, *IBIS TRAX3D* et *BulleText*, avec le cas *5VS23* (les projectiles de référence sont le deuxième et le troisième projectile, et le projectile de test est le cinquième projectile).

Les courbes *CMC* des dix-neuf autres cas, du scénario *projectile-arme* exploitant un apprentissage basé sur deux projectiles, sont présentées dans l'annexe A1.

Le système *BulleText* présente des performances sur les courbes *CMC* qui dépassent largement les deux autres systèmes. Ce constat sera fait pour tous les cas où le nombre de projectiles utilisés pour l'apprentissage est augmenté. Les résultats correspondants sont présents dans les sections suivantes.

**8.2.2.1.1 Analyse des cas de faux rapprochements du système *BulleText* avec un apprentissage exploitant deux projectiles** Le tableau 12 présente les vingt-deux faux rapprochements obtenus par *BulleText* pour le cas *5VS23*. Les tableaux correspondant aux autres dix-neuf cas sont donnés dans l'annexe A3.

Les tableaux donnent le numéro de l'arme attendue (la source correcte - `expected_firearm`) et son rapport de vraisemblance (`LR_expected`), puis le numéro de l'arme prédite en position 1 (`Predicted_firearm`), son *LR* (`LR_Predicted`), ainsi que son rang (`rank`). Cette structure sera celle de tous les tableaux des résultats en lien avec l'analyse des faux rapprochements.

Dans le cas d'espèce, la majorité des faux rapprochements sont commis en laissant l'arme d'intérêt dans les premiers rangs.

Les figures (42, 43 et 44) illustrent des cas dont la méthode *BulleText* a conduit à de faux rapprochements au premier rang.

Comme précédemment, ces illustrations permettent à un spécialiste de se rendre compte de la proximité perçue dans les cas de faux rapprochements. Les erreurs commises par le système reflètent réellement une proximité des textures qui offrent un potentiel de faux rapprochement aussi pour un examinateur.

Les présentes observations vont se répéter dans les présentations des résultats lorsque le nombre de projectiles utilisés pour l'apprentissage est augmenté en passant de 3, 4 et 5 projectiles. Nous allons présenter les résultats sans la nécessité de commenter l'ensemble de ceux-ci avant qu'ils ne soient repris dans la discussion du chapitre.

**8.2.2.1.2 Influence de la taille de la base de données avec un apprentissage exploitant deux projectiles** La figure 46 donne l'évolution de la précision de la méthode *BulleText* (au rang 1) pour le cas

d'apprentissage effectué par les deuxièmes et troisièmes projectiles, et le test effectué avec les quatre autres projectiles.

Les figures présentant de l'évolution de la précision de la méthode, selon la taille de la base de données, pour les autres quatre cas (*allVS12*, *allVS34*, *allVS45* et *allVS56*), sont documentés dans l'annexe A2.

**8.2.2.1.3 Cas de projectile exploitable fortement endommagé** Le tableau 13 synthétise les résultats obtenus, pour les vingt cas de la configuration d'apprentissage par deux projectiles, en matière de bon classement en première position, et parmi les dix premières positions de la liste de rapprochement issue de la discrimination par la solution *BulleText*.

Table 10: Résultats de la précision des rapprochements au premier rang des systèmes *EVOFINDER*, *IBIS TRAX3D* et *BulleText* avec un apprentissage exploitant deux projectiles. Taille de la base de données : 200 AKM47

	EVO_22	EVO_50	IBIS_1	IBIS_2	IBIS_3	IBIS_4	IBIS_5	BulleText
5VS12	0.24	0.28	0.16	0.16	0.23	0.58	0.70	0.74
5VS23	0.32	0.33	0.20	0.19	0.25	0.68	0.77	0.89
5VS34	0.32	0.45	0.18	0.20	0.29	0.77	0.84	0.94
6VS12	0.27	0.28	0.09	0.09	0.16	0.59	0.63	0.66
6VS23	0.28	0.36	0.13	0.14	0.18	0.66	0.69	0.86
6VS34	0.29	0.41	0.18	0.20	0.24	0.76	0.78	0.94

Table 11: Résultats de la précision des rapprochements au premier rang des systèmes *EVOFINDER* et *BulleText* avec un apprentissage exploitant deux projectiles. Taille de la base de données : 200 AKM47

	EVOFINDER_22	EVOFINDER_50	BulleText
3VS12	0.32	0.41	0.87
4VS12	0.30	0.34	0.86
5VS12	0.24	0.28	0.74
6VS12	0.27	0.28	0.66
1VS23	0.24	0.28	0.63
4VS23	0.40	0.47	0.90
5VS23	0.32	0.33	0.89
6VS23	0.28	0.36	0.86
1VS34	0.18	0.26	0.58
2VS34	0.38	0.45	0.90
5VS34	0.32	0.45	0.94
6VS34	0.29	0.41	0.94
1VS45	0.20	0.24	0.54
2VS45	0.30	0.36	0.84
3VS45	0.35	0.43	0.94
6VS45	0.42	0.49	0.94
1VS56	0.18	0.20	0.42
2VS56	0.24	0.30	0.76
3VS56	0.30	0.36	0.90
4VS56	0.31	0.42	0.92

Table 12: Faux rapprochements obtenus par le système *BulleText* pour le cas *5VS23*. Taille de la base de données : 200 AKM47

Expected_firearm	LR_Expected	Predicted_firearm	LR_Predicted	Rank
27	65.405	22	66.333	2
37	66.272	3	66.317	2
45	30.993	159	66.329	4
49	189.054	116	197.842	2
55	8.454	130	53.188	3
59	0.000	125	66.333	15
62	53.191	136	66.227	2
69	12.901	31	66.213	5
75	0.398	164	66.333	6
76	0.001	156	66.278	18
92	52.947	89	66.315	3
95	0.000	175	66.325	29
97	0.006	155	66.321	12
104	0.000	157	66.321	32
138	0.150	48	64.147	14
148	19.092	111	66.231	5
149	33.821	145	66.332	3
156	54.180	159	61.432	3
158	49.748	179	65.624	3
161	0.011	159	66.027	11
176	21.402	183	57.903	4
196	66.333	144	66.333	2

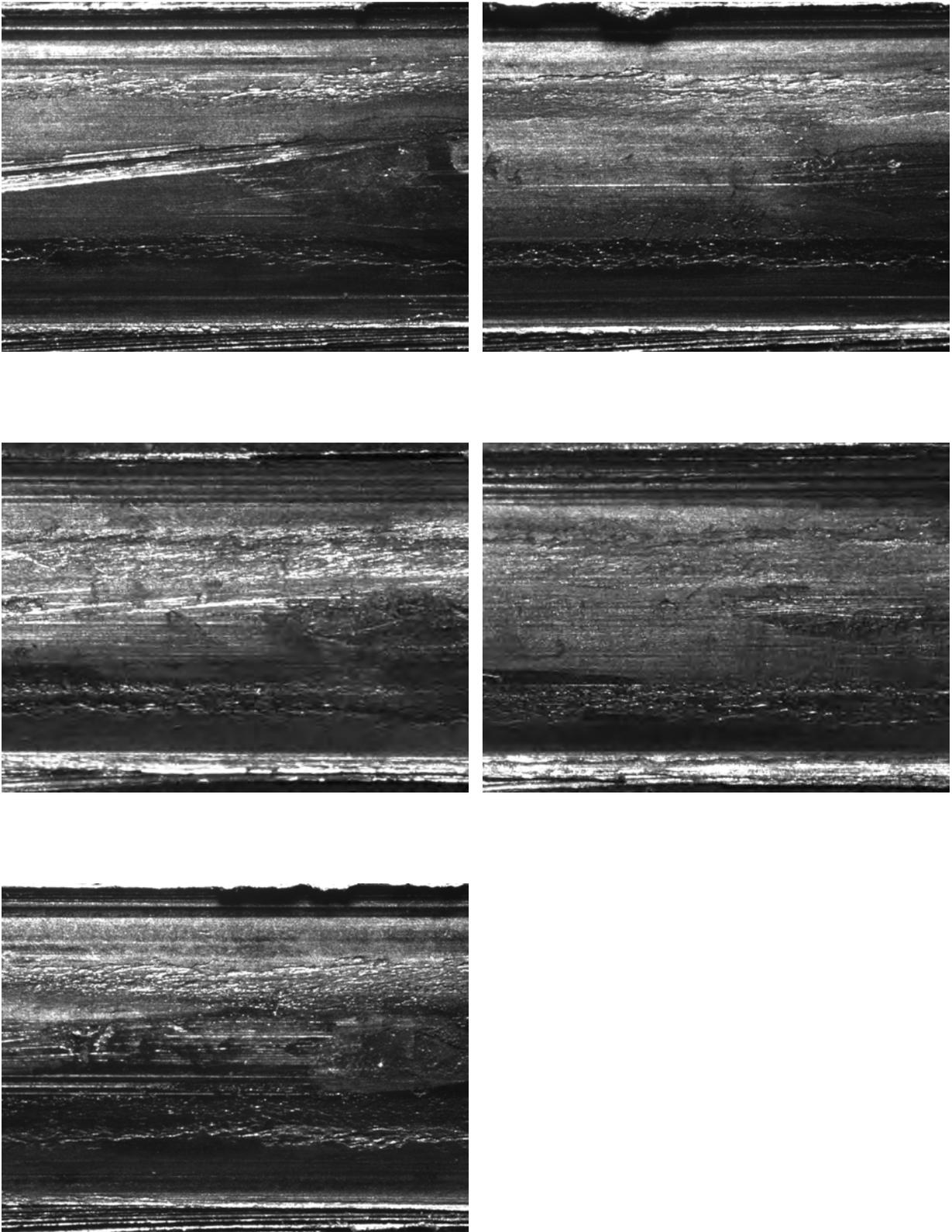


Figure 42: Configuration: *5VS23*. Fausse exclusion dans le champ  $n^{\circ}2$  des projectiles *5* (en bas) et *2* et *3* (en haut) de l'arme *104*. Faux rapprochement entre le champ  $n^{\circ}2$  du projectile de test de l'arme *104* (en bas) et le champ  $n^{\circ}4$  des projectiles de référence *2* et *3* de l'arme *157* (au milieu).

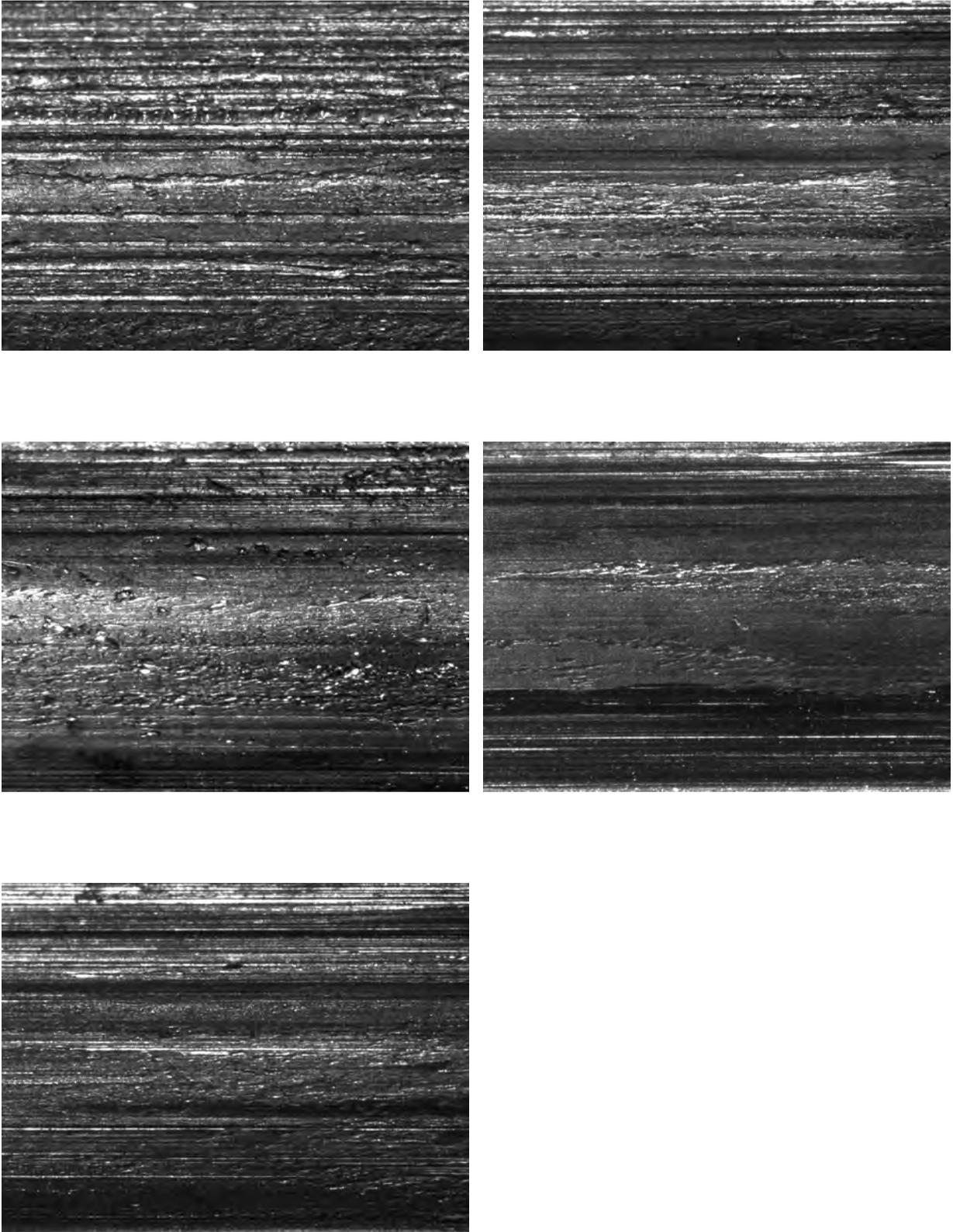


Figure 43: Configuration: *5VS23*. Fausse exclusion dans le champ  $n^{\circ}2$  des projectiles *5* (en bas) et *2* et *3* (en haut) de l'arme *196*. Faux rapprochement entre le champ  $n^{\circ}2$  du projectile de test de l'arme *196* (en bas) et le champ  $n^{\circ}1$  des projectiles de référence *2* et *3* de l'arme *144* (au milieu).

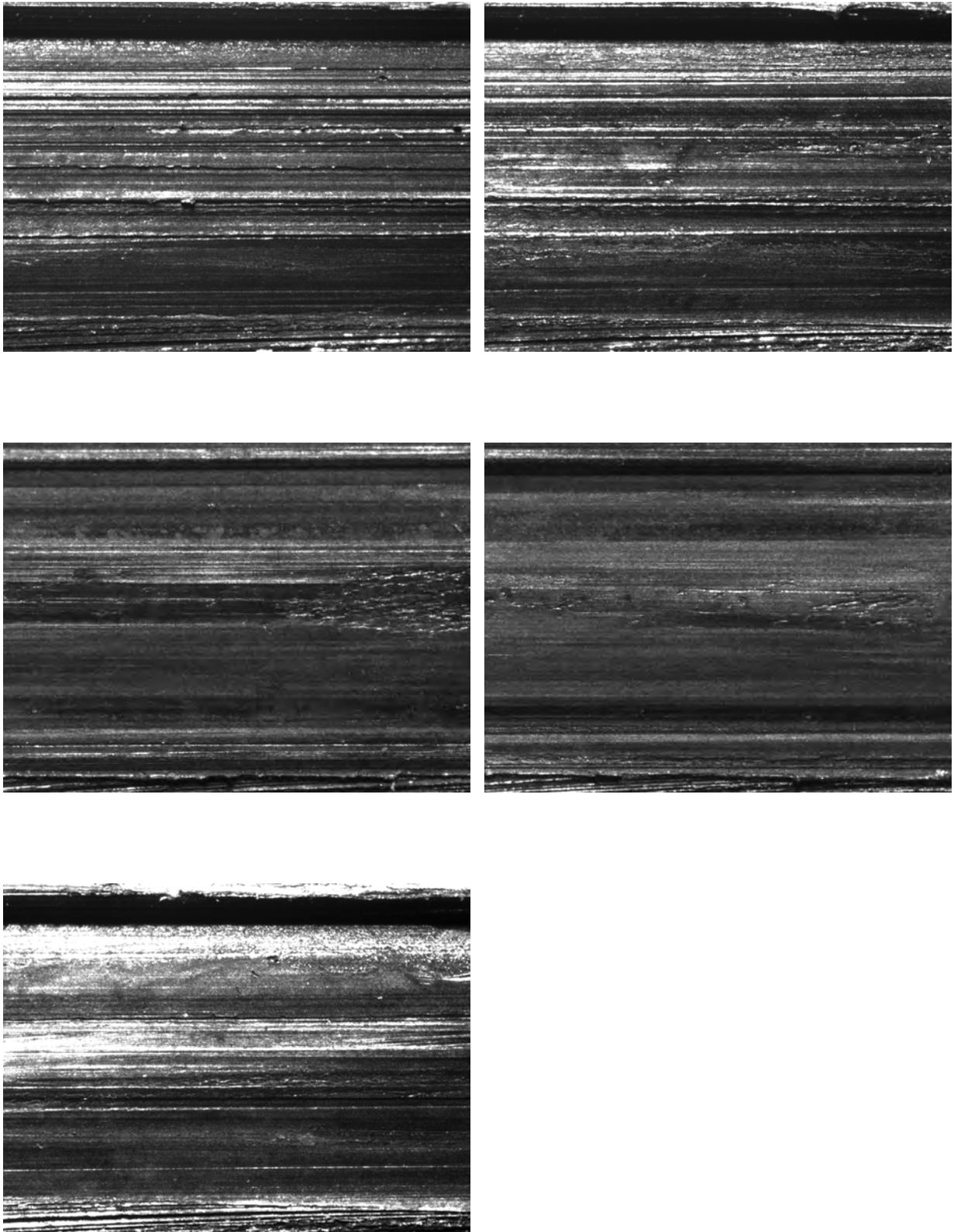


Figure 44: Configuration: 5VS23. Fausse exclusion dans le champ  $n^{\circ}4$  des projectiles 5 (en bas) et 2 et 3 (en haut) de l'arme 97. Faux rapprochement entre le champ  $n^{\circ}4$  du projectile de test de l'arme 97 (en bas) et le champ  $n^{\circ}4$  des projectiles de référence 2 et 3 de l'arme 155 (au milieu).

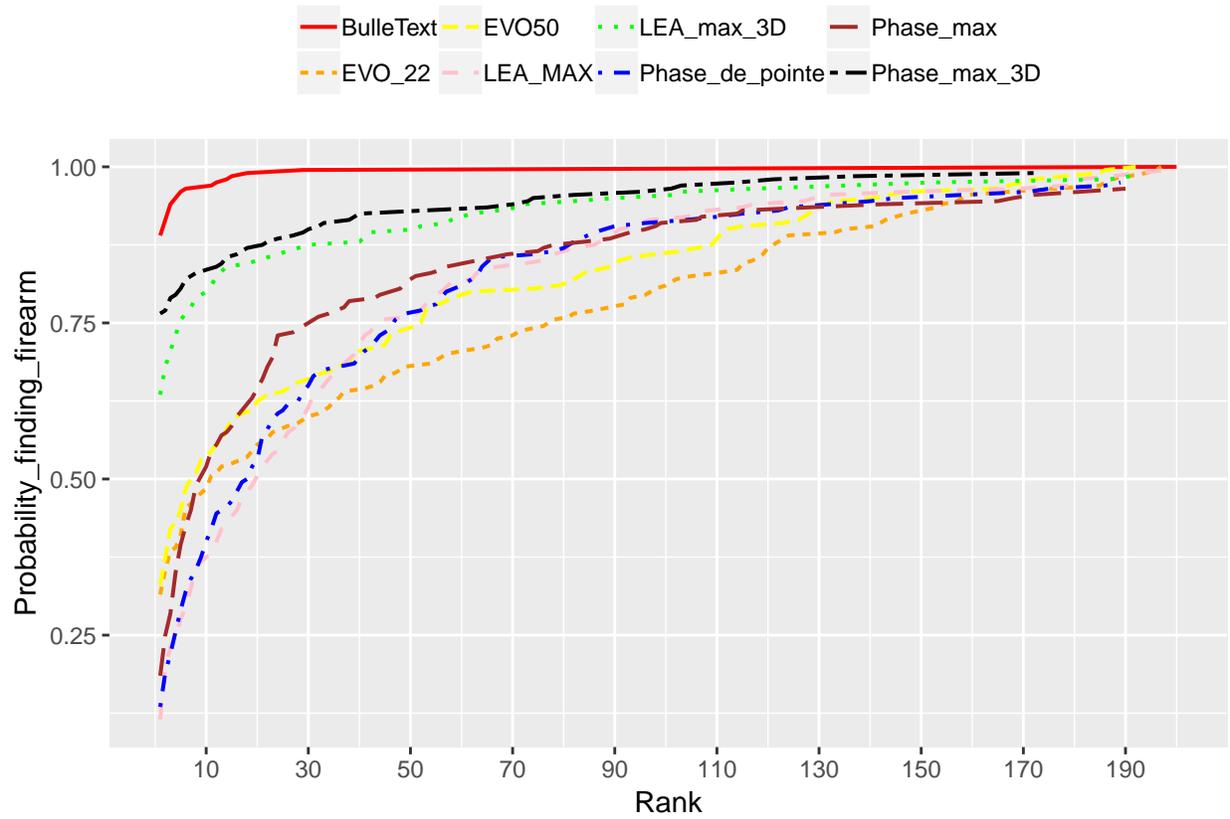


Figure 45: Courbes *CMC* obtenues par les systèmes *EVOFINDER* (deux variantes), *IBIS TRAX3D* (cinq variantes) et *BulleText* dans le cas *5VS23*. Taille de la base de données : 200 AKM47

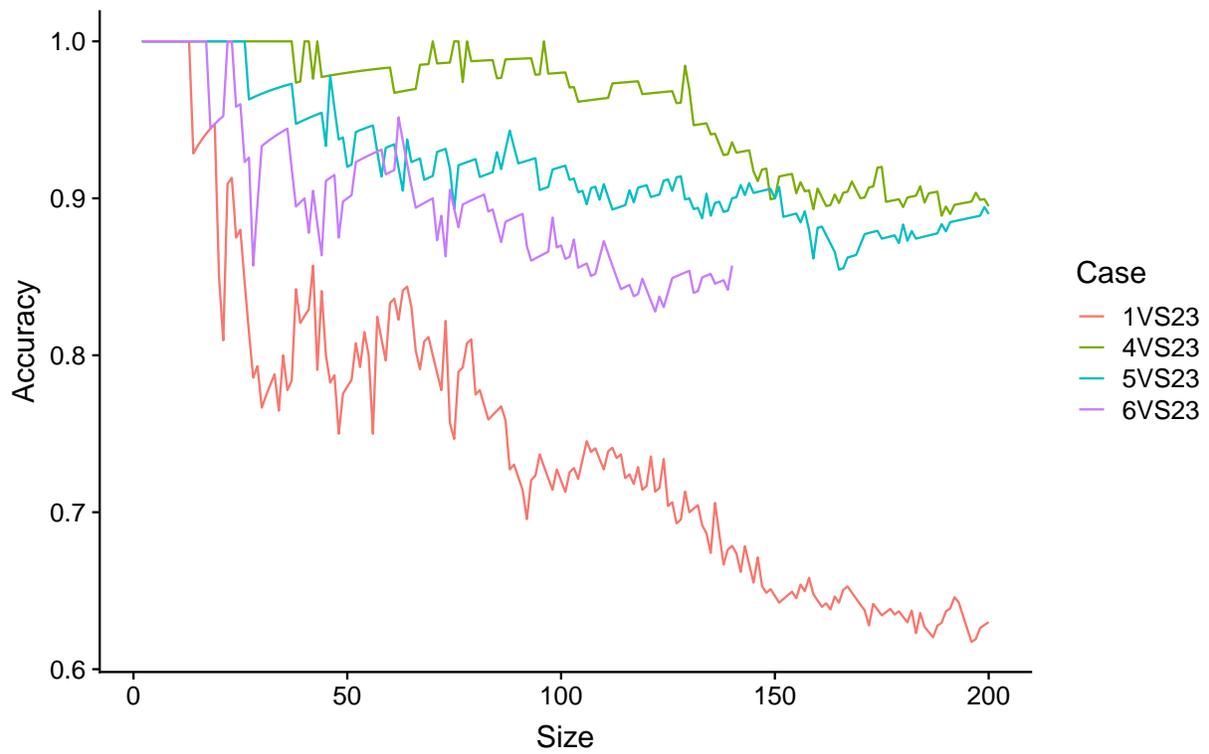


Figure 46: Configuration: *allVS23*. Évolution de la précision du système *BulleText* en fonction de la taille de la base de données.

Table 13: Résultats de la précision des rapprochements au premier rang et parmi le TOP-10 réalisés par la solution *BulleText* avec un apprentissage exploitant 2 projectiles. Taille de la base de données : 800 champs de 200 AKM47

	first_position	top_10
3VS12	0.55	0.80
4VS12	0.49	0.74
5VS12	0.44	0.72
6VS12	0.36	0.66
1VS23	0.35	0.64
4VS23	0.63	0.85
5VS23	0.56	0.82
6VS23	0.50	0.77
1VS34	0.30	0.56
2VS34	0.61	0.82
5VS34	0.67	0.88
6VS34	0.58	0.84
1VS45	0.30	0.56
2VS45	0.52	0.77
3VS45	0.65	0.87
6VS45	0.64	0.88
1VS56	0.22	0.51
2VS56	0.45	0.72
3VS56	0.58	0.83
4VS56	0.63	0.87

**8.2.2.2 Apprentissage avec trois projectiles** Au total, il existe douze ( $4 \times 3$ ) cas possibles pour cette configuration. Mais, étant donné que le système *IBIS TRAX3D*, contrairement au *EVOFINDER* et *BulleText*, ne donne pas la possibilité d'effectuer des comparaisons entre les projectiles de référence de la même arme, il ne reste que quatre cas communs entre *IBIS TRAX3D*, *EVOFINDER* et *BulleText*, à savoir *5VS123*, *5VS234*, *6VS123*, et *6VS234*.

Les résultats des rapprochements au rang 1 pour ces quatre derniers cas sont présentés dans le tableau 14. Comme attendu, les performances sont meilleures pour *BulleText* qui bénéficie d'un échantillon d'apprentissage plus grand. On note également que plus le projectile de test est éloigné des tirs d'apprentissage (dans la succession des tirs), plus la précision baisse. Par exemple de 98% pour le test du 5ème projectile lorsque les projectiles 2, 3 et 4 sont dans le set d'apprentissage, la précision passe à 92% lorsqu'il est testé sur un set d'apprentissage faits des projectiles 1, 2 et 3.

le tableau 15 documente la comparaison des performances entre *EVOFINDER* et *BulleText*, pour les autres huit cas, à savoir *4VS123*, *5VS123*, *1VS234*, *1VS345*, *2VS345*, *1VS456*, *2VS456*, et *3VS456*.

Les mêmes observations sont faites, à savoir: - plus le projectile de test est distant du set d'apprentissage, plus les performances sont diminuées. - le projectile de test numéro 1 est toujours défavorisé en termes de performance, par rapport aux projectiles suivants, obtenus avec un canon échauffé par les tirs par rapport au premier projectile.

La figure 53 représentent les courbes *CMC* obtenues, par *EVOFINDER*, *IBIS TRAX3D* et *BulleText*, dans ce scénario avec le cas *6VS234*.

Les projectiles de référence sont le deuxième, le troisième et le quatrième projectile, et le projectile de test est le sixième projectile.

Les courbes *CMC* des onze autres cas, en exploitant trois projectiles pour l'apprentissage, sont fournies en annexe A1. Les courbes des précisions aux rangs 1 et 10 confirment la supériorité du système *BulleText* et son amélioration grâce à l'augmentation de la taille de l'échantillon d'apprentissage.

**8.2.2.2.1 Analyse des cas de faux rapprochements du système *BulleText* avec un apprentissage exploitant trois projectiles** Le tableau 16 représente les six faux rapprochements pour le cas *6VS234*. Les tableaux correspondent aux autres onze cas se sont intégrés dans l'annexe A3. Le nombre de faux rapprochements est limité et les armes correspondantes sont détectées dans les 10 premiers rangs. Ces résultats attestent de l'augmentation des performances lorsque la taille de l'échantillon d'apprentissage est augmentée.

Les figures (47, 48, 49, 50, 51 et 52) illustrent des cas dont la méthode *BulleText* a conduit à de faux rapprochements au rang 1.

Comme pour les sections précédentes, ces exemples de champs illustrent, pour un oeil expert, les hauts degrés d'association au niveau de la texture, observés pour ces faux rapprochements. Ils excèdent visuellement le degré de similarité observé avec les champs provenant des tirs effectués avec la bonne arme.

**8.2.2.2.2 Influence de la taille de la base de données avec un apprentissage exploitant trois projectiles** La figure 54 représente l'évolution de la précision de la méthode pour le cas d'apprentissage effectué par le deuxième, troisième et quatrième projectiles, et les tests effectués avec les autres trois projectiles. Le cas du premier projectile (projectile "froid") est typique du comportement du système. Les autres projectiles maintiennent un haut niveau de performance (au-dessus de 90%) qu'elle que soit la taille de la base de données.

Les figures de l'évolution de la précision de la méthode selon la taille de la base de données, pour les trois autres cas (*allVS123*, *allVS345* et *allVS456*), sont fournies dans annexe A2

**8.2.2.2.3 Cas de projectile exploitable fortement endommagé** Le tableau 17 synthétise les résultats obtenus, pour les douze cas de la configuration d'apprentissage par trois projectiles, en matière de bon classement en première position, et parmi les dix premières positions de la liste de rapprochement issue de la discrimination par la solution *BulleText*.

Table 14: Résultats de la précision des rapprochements au premier rang pour les systèmes *EVOFINDER*, *IBIS TRAX3D* et *BulleText* en exploitant trois projectiles pour l'apprentissage

	EVO_22	EVO_50	IBIS_1	IBIS_2	IBIS_3	IBIS_4	IBIS_5	BulleText
5VS123	0.32	0.36	0.21	0.22	0.32	0.73	0.82	0.92
5VS234	0.36	0.44	0.24	0.27	0.32	0.80	0.86	0.98
6VS123	0.31	0.36	0.14	0.17	0.24	0.76	0.78	0.91
6VS234	0.34	0.42	0.21	0.21	0.32	0.80	0.80	0.96

Table 15: Résultats de la précision des rapprochements au premier rang pour les systèmes *EVOFINDER* et *BulleText* en exploitant trois projectiles pour l'apprentissage

	EVOFINDER_22	EVOFINDER_50	BulleText
4VS123	0.40	0.47	0.96
5VS123	0.32	0.36	0.92
6VS123	0.31	0.36	0.91
1VS234	0.24	0.32	0.74
5VS234	0.36	0.44	0.98
6VS234	0.34	0.42	0.96
1VS345	0.21	0.28	0.60
2VS345	0.38	0.46	0.90
6VS345	0.43	0.52	0.98
1VS456	0.22	0.24	0.54
2VS456	0.32	0.40	0.89
3VS456	0.37	0.48	0.97

Table 16: Faux rapprochements obtenus avec le système *BulleText* pour le cas *6VS234*

Expected_firearm	LR_Expected	Predicted_firearm	LR_Predicted	Rank
86	0.688	145	66.149	6
119	54.798	196	59.210	2
136	29.756	137	42.211	4
138	64.329	56	65.592	4
156	10.688	188	65.683	4
174	54.343	150	66.215	2

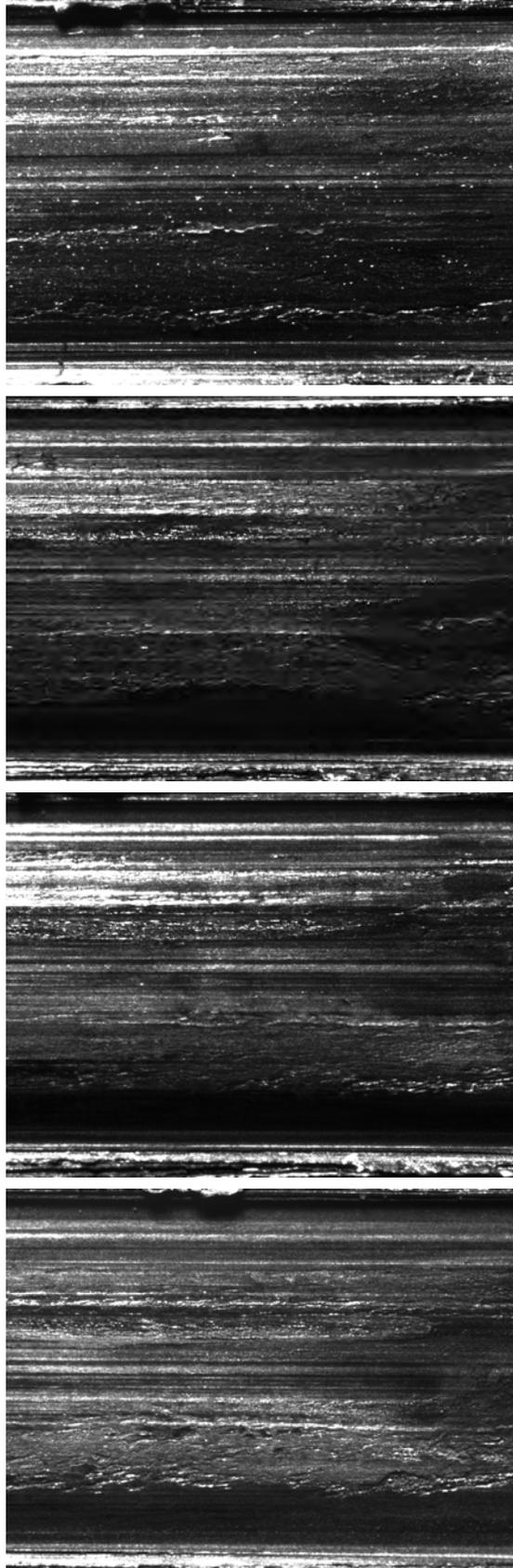


Figure 47: Configuration: *6VS234*. Fausse exclusion (*6ème* position dans la liste de corrélation) pour le champ *n°2* des projectiles *6* (en bas) et *2, 3* et *4* de l'arme *86*.

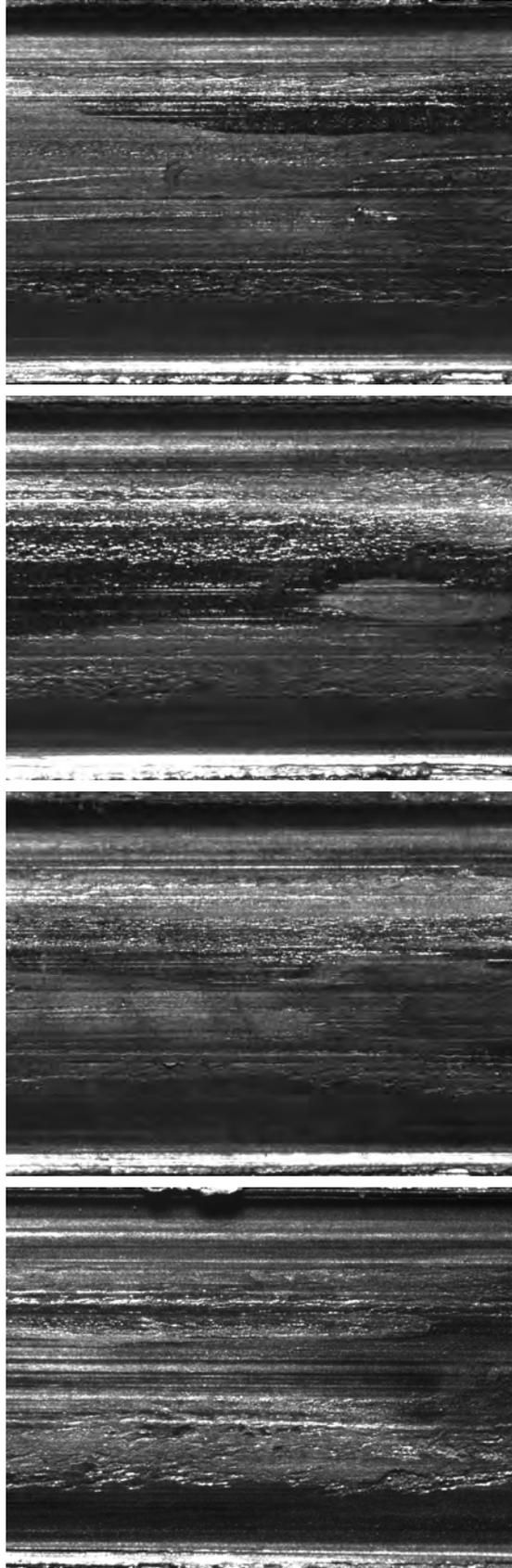


Figure 48: Configuration *6VS234* : faux rapprochement entre le champ  $n^{\circ}2$  du projectile de test de l'arme *86* (en bas) et le champ  $n^{\circ}3$  des projectiles de référence *2*, *3* et *4* de l'arme *145*.

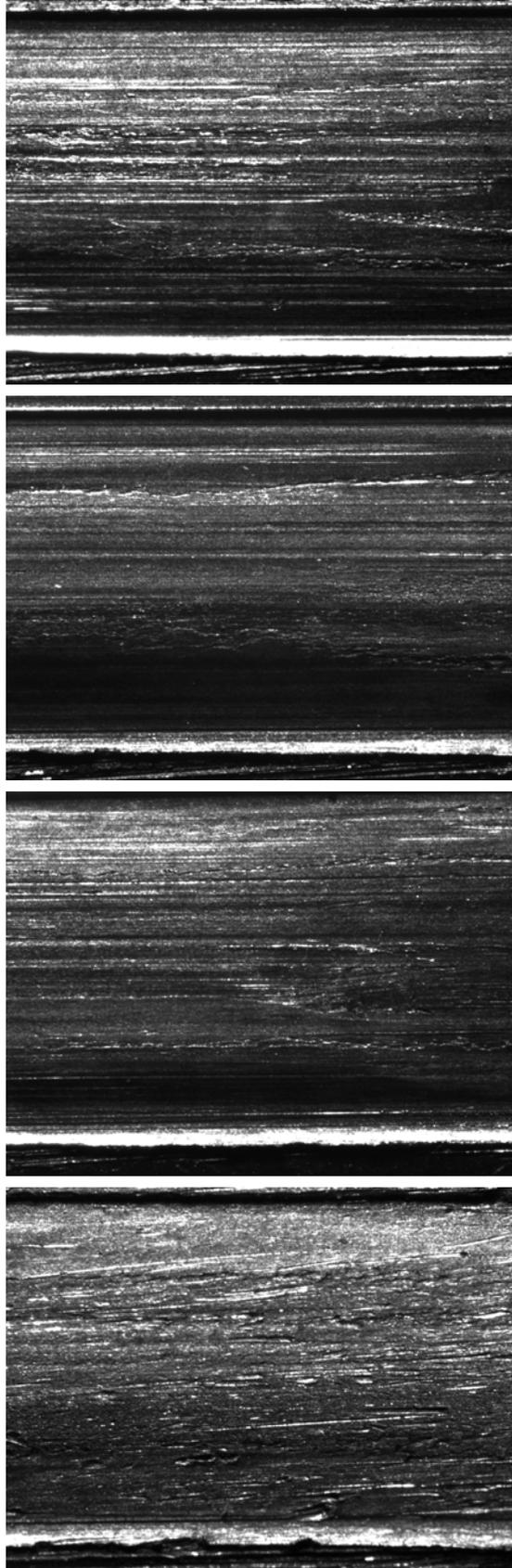


Figure 49: Configuration: *6VS234*. Fausse exclusion (*2ème* position dans la liste de corrélation) pour le champ *n°2* des projectiles *6* (en bas) et *2, 3* et *4* de l'arme *119*.

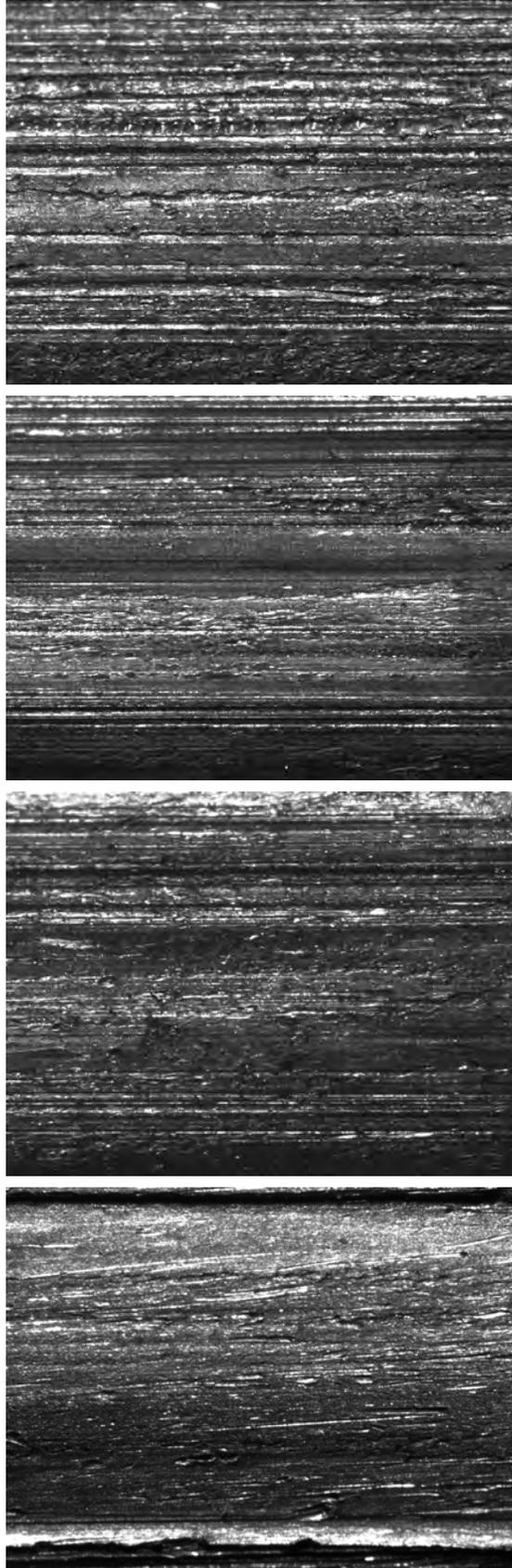


Figure 50: Configuration: faux rapprochement entre le champ  $n^{\circ}2$  du projectile de test de l'arme 119 (en bas) et le champ  $n^{\circ}2$  des projectiles de référence 2, 3 et 4 de l'arme 196.

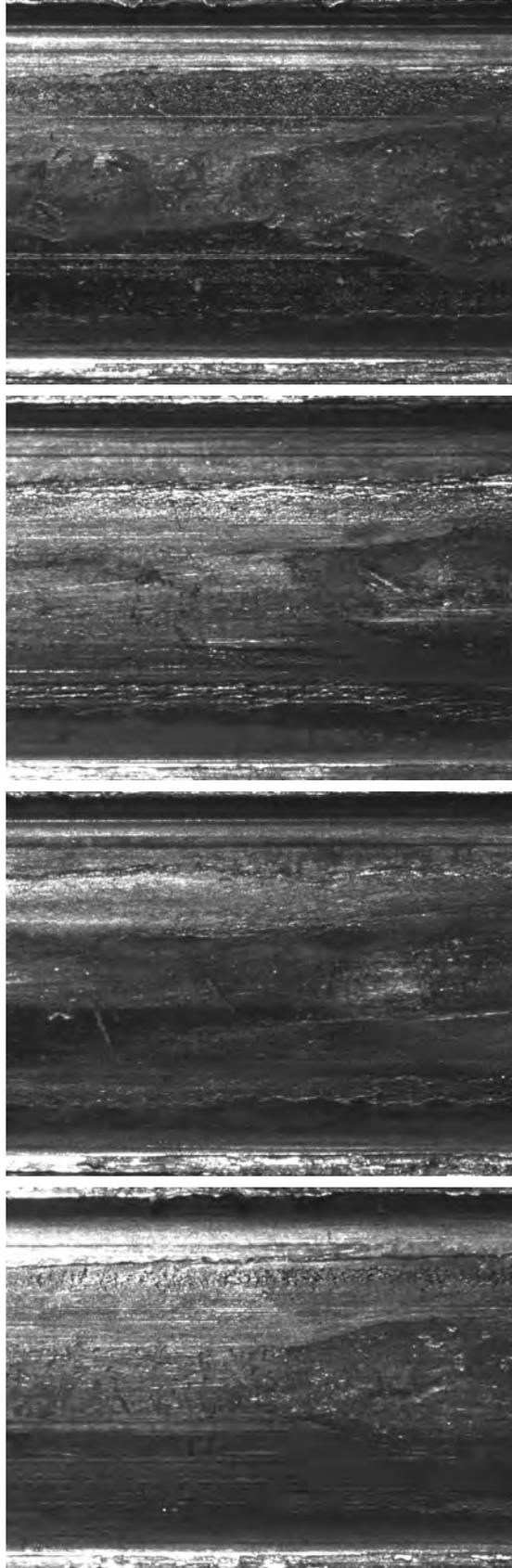


Figure 51: Configuration: *6VS234*. Fausse exclusion (*4ème* position dans la liste de corrélation) pour le champ *n°4* des projectiles *6* (en bas) et *2, 3* et *4* del'arme *156*.

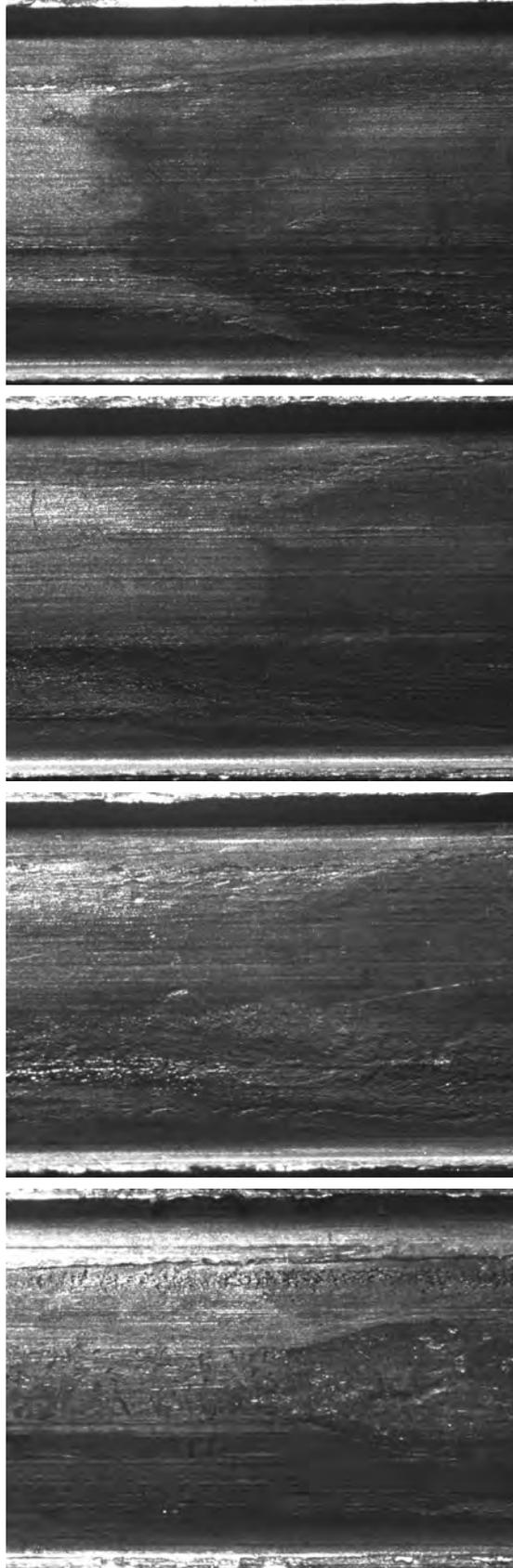


Figure 52: Configuration: faux rapprochement entre le champ  $n^{\circ}4$  du projectile de test de l'arme 156 (en bas) et le champ  $n^{\circ}1$  des projectiles de référence 2, 3 et 4 de l'arme 188.

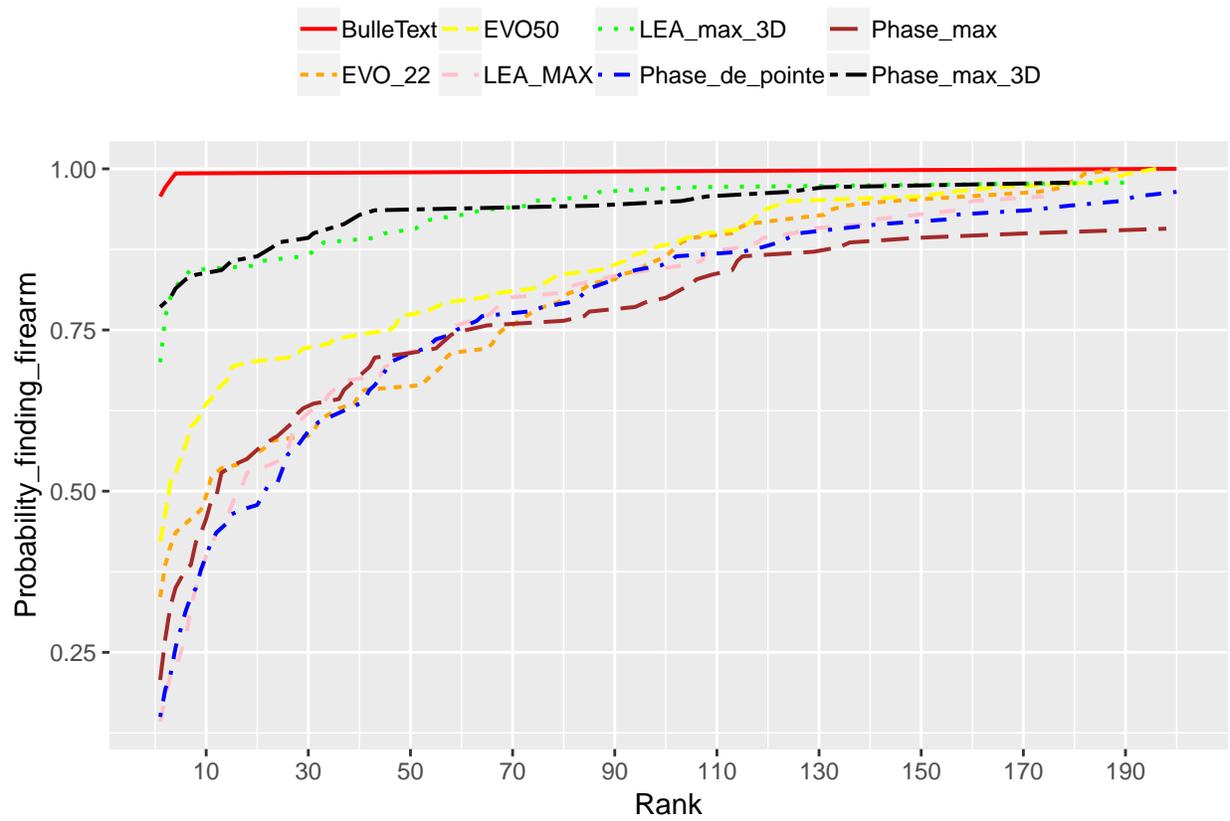


Figure 53: les Courbes *CMC* obtenues par les systèmes *EVOFINDER* (deux variantes), *IBIS TRAX3D* (cinq variantes) et *BulleText* dans le cas *6VS234*. Taille de la base de données : 200 AKM47

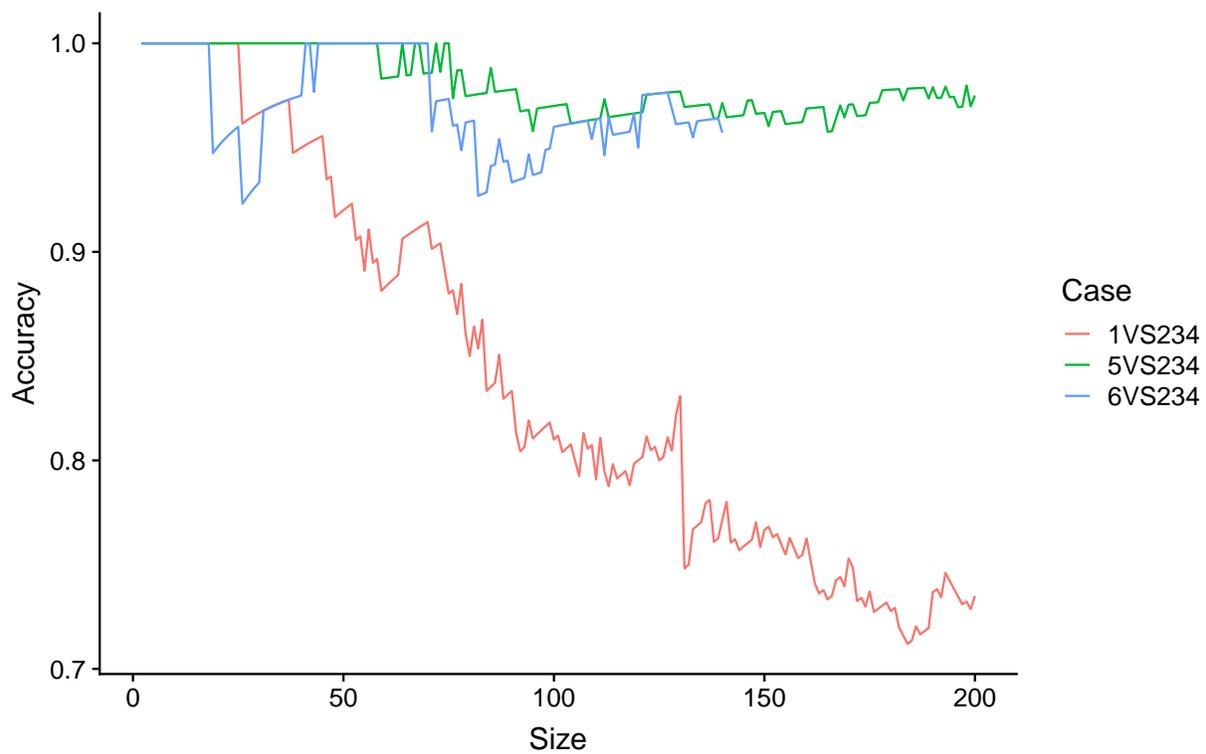


Figure 54: Configuration: *allVS234*. Évolution de la précision du système *BulleText* en fonction de la taille de la base de données.

Table 17: Résultats de la précision des rapprochements au premier rang et parmi le TOP-10 réalisés par la solution *BulleText* avec un apprentissage exploitant 3 projectiles. Taille de la base de données : 800 champs de 200 AKM47

	first_position	top_10
4VS123	0.70	0.91
5VS123	0.63	0.86
6VS123	0.58	0.83
1VS234	0.44	0.70
5VS234	0.73	0.91
6VS234	0.66	0.88
1VS345	0.35	0.64
2VS345	0.66	0.87
6VS345	0.74	0.92
1VS456	0.30	0.61
2VS456	0.61	0.84
3VS456	0.74	0.92

**8.2.2.3 Apprentissage avec quatre projectiles** Au total, il existe six ( $3 \times 2$ ) cas possibles pour cette configuration. Mais, étant donné que le système *IBIS TRAX3D*, contrairement au *EVOFINDER* et *BulleText*, il ne reste que deux cas communs entre *IBIS TRAX3D*, *EVOFINDER* et *BulleText*, à savoir *5VS1234*, et *6VS1234*. Les résultats pour ces deux cas sont présentés dans le tableau 18.

Le tableau 19 documente la comparaison entre *EVOFINDER* et *BulleText*, pour les quatre autres cas, à savoir *1VS2345*, *6VS2345*, *1VS3456*, et *2VS3456*.

Dans les deux cas, en raison de l'augmentation à 4 de la taille de l'échantillon d'apprentissage.

La figure 57 représente les courbes *CMC* obtenues, par *EVOFINDER*, *IBIS TRAX3D* et *BulleText*, avec le cas *6VS1234*. Les projectiles de référence sont le premier, le deuxième, le troisième et le quatrième projectile, et le projectile de test est le sixième projectile). Les courbes *CMC* des cinq autres cas, avec un apprentissage exploitant quatre projectiles, sont fournies dans l'annexe A1.

**8.2.2.3.1 Analyse des cas de faux rapprochements du système *BulleText* avec un apprentissage exploitant quatre projectiles** Le tableau 20 représente les trois faux rapprochements obtenus avec le système *BulleText* pour le cas *6VS1234*. Les tableaux correspondant aux cinq autres cas, à savoir (*5VS1234*, *1VS2345*, *6VS2345*, *1VS3456* et *2VS3456*) sont jointes dans l'annexe A3.

Il faut relever dans ces trois cas que la distance en termes de *LR* entre la source correcte et la source faussement proposée en rang 1 est très faible (au maximum 5 rangs et une différence de *LR* inférieure à 50).

Les figures 55 et 56 illustrent ces cas de faux rapprochements en rang 1 afin de montrer les degrés d'association observables au niveau des textures.

**8.2.2.3.2 Influence de la taille de la base de données avec un apprentissage exploitant quatre projectiles** La figure 58 représente l'évolution de la précision de la méthode pour le cas d'apprentissage effectué par les quatre premiers projectiles, et les tests effectués avec les deux autres projectiles. Les figures de l'évolution de la précision de la méthode selon la taille de la base de données, pour les deux autres cas (*allVS2345* et *allVS3456*), sont disponibles dans l'annexe A2.

Les comportements précédemment relevés sont observés dans ces conditions.

**8.2.2.3.3 Cas de projectile exploitable fortement endommagé** Le tableau 21 synthétise les résultats obtenus, pour les six cas de la configuration d'apprentissage par quatre projectiles, en matière de bon classement en première position, et parmi les dix premières positions de la liste de rapprochement issue de la discrimination par la solution *BulleText*.

Table 18: Résultats de discrimination obtenus par: *EVOFINDER*, *IBIS TRAX3D* et *BulleText* avec un apprentissage exploitant quatre projectiles

	EVO_22	EVO_50	IBIS_1	IBIS_2	IBIS_3	IBIS_4	IBIS_5	BulleText
5VS1234	0.36	0.46	0.12	0.13	0.28	0.74	0.82	0.98
6VS1234	0.36	0.43	0.23	0.25	0.36	0.85	0.86	0.98

Table 19: Résultats de discrimination obtenus par: *EVOFINDER* et *BulleText* avec avec un apprentissage exploitant quatre projectiles

	EVOFINDER_22	EVOFINDER_50	BulleText
1VS2345	0.24	0.32	0.77

	EVOFINDER_22	EVOFINDER_50	BulleText
1VS3456	0.24	0.26	0.57
2VS3456	0.40	0.48	0.90
6VS2345	0.44	0.53	1.00

Table 20: Faux rapprochements obtenus avec le système *BulleText* pour le cas 6VS1234

Expected_firearm	LR_Expected	Predicted_firearm	LR_Predicted	Rank
86	58.638	156	64.924	3
156	11.429	188	66.039	5
174	47.137	200	63.744	3

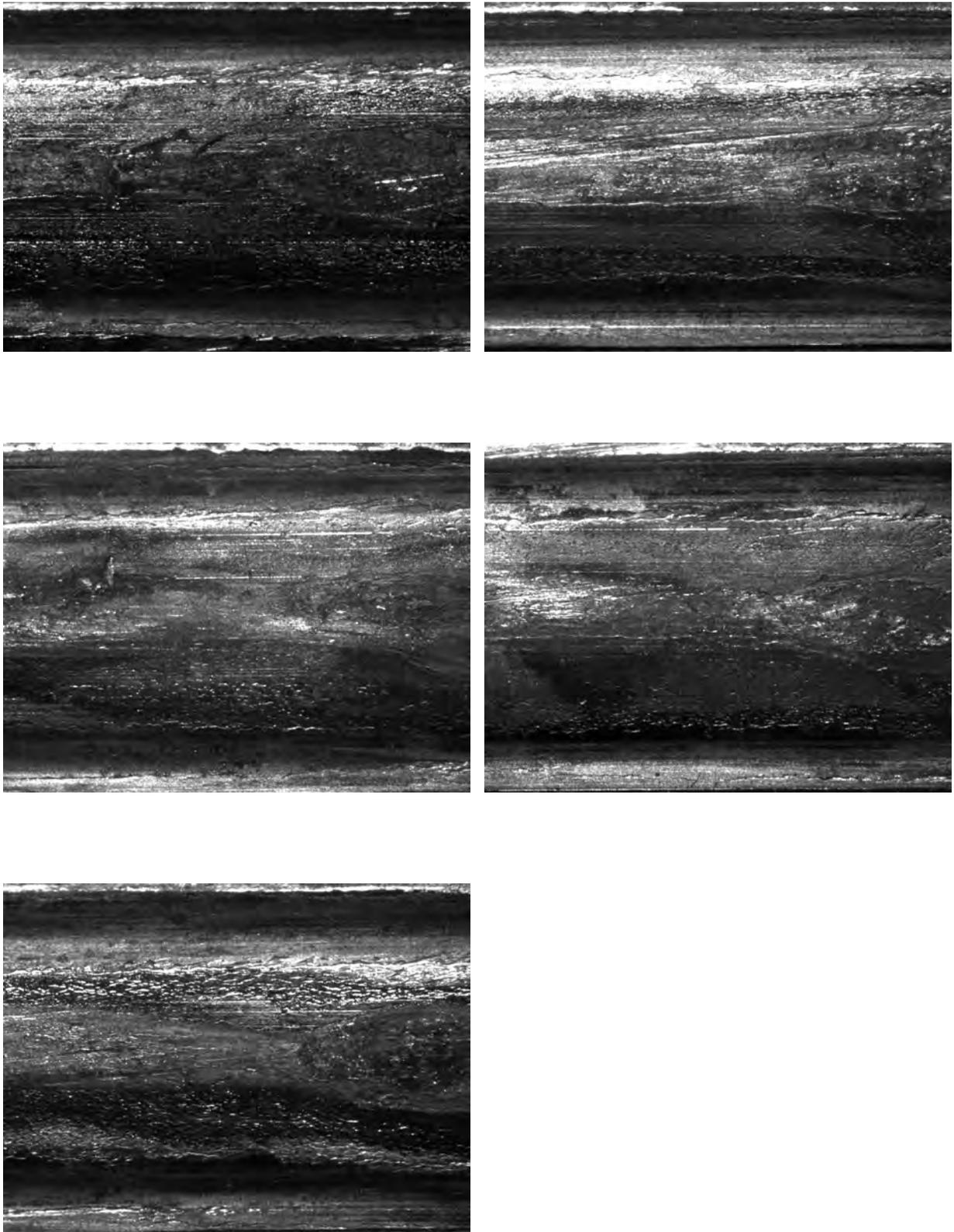


Figure 55: Configuration: *6VS1234*. Fausse exclusion (*3ème* position dans la liste de corrélation) pour le champ *n°1* des projectiles *6* (en bas) et *1, 2, 3* et *4* de l'arme *174*.

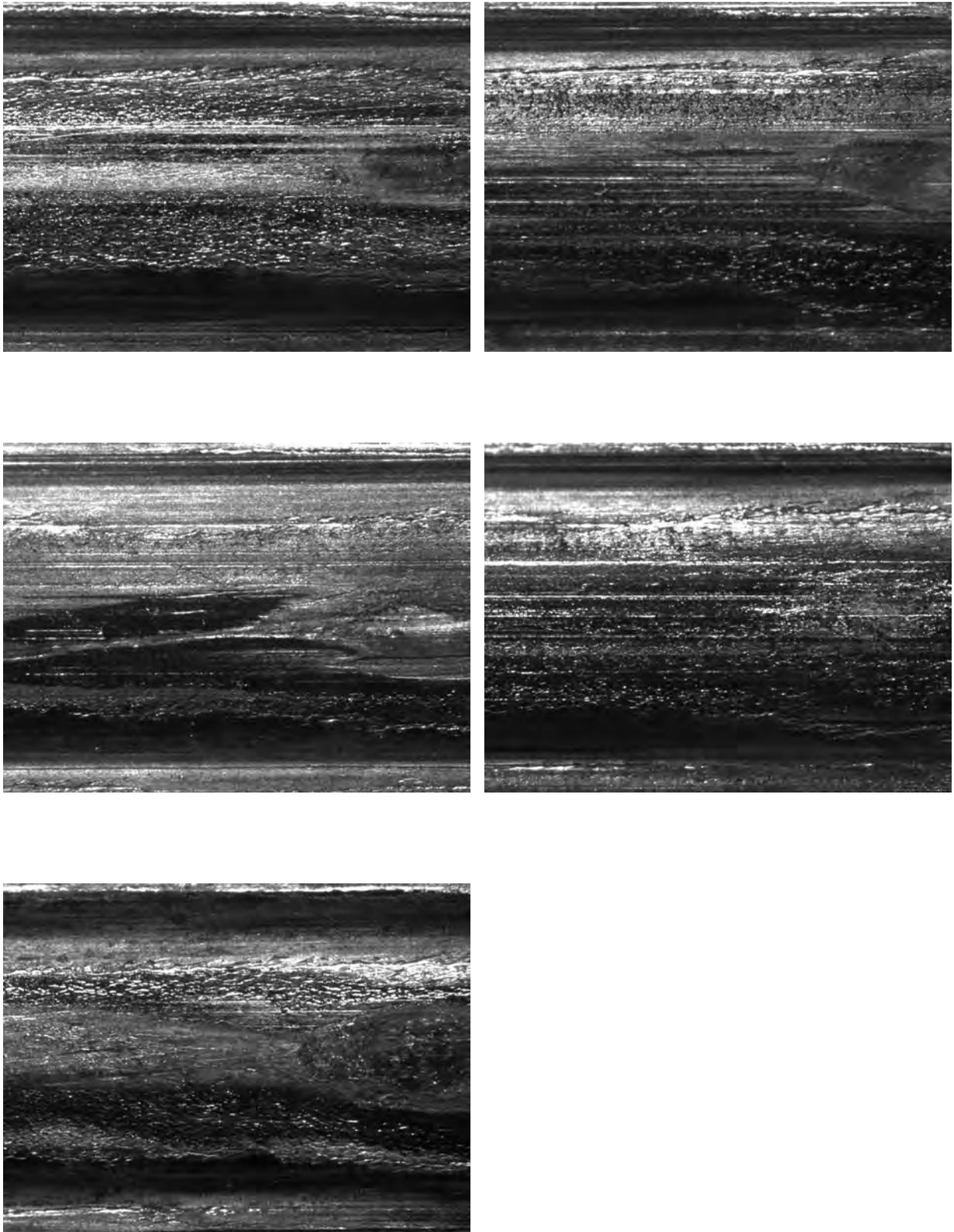


Figure 56: Configuration: *6VS1234*. faux rapprochement entre le champ  $n^{\circ}1$  du projectile de test de l'arme *174* (en bas) et le champ  $n^{\circ}1$  des projectiles de référence *1*, *2*, *3* et *4* de l'arme *200*.

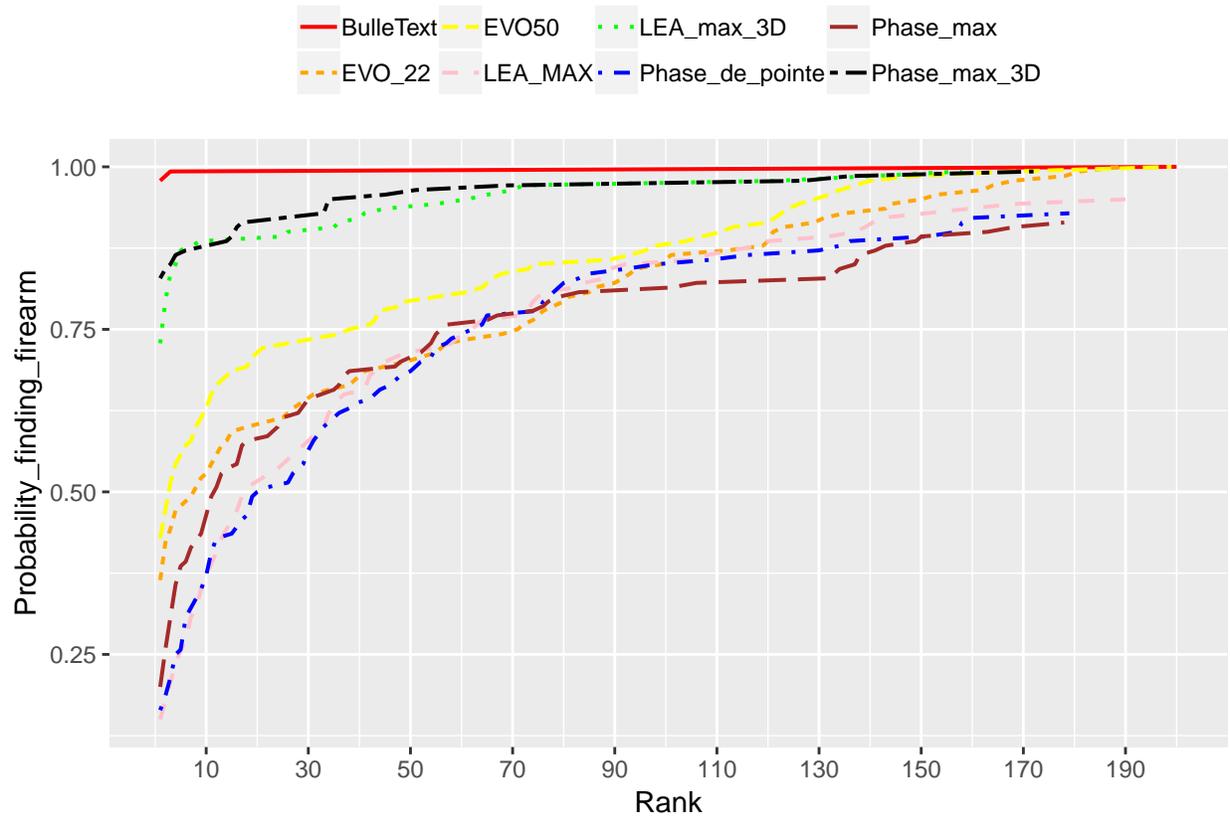


Figure 57: les Courbes CMC obtenues par les systèmes *EVOFINDER* (deux variantes), *IBIS TRAX3D* (cinq variantes) et *BulleText* dans le cas *6VS1234*. Taille de la base de données : 200 AKM47

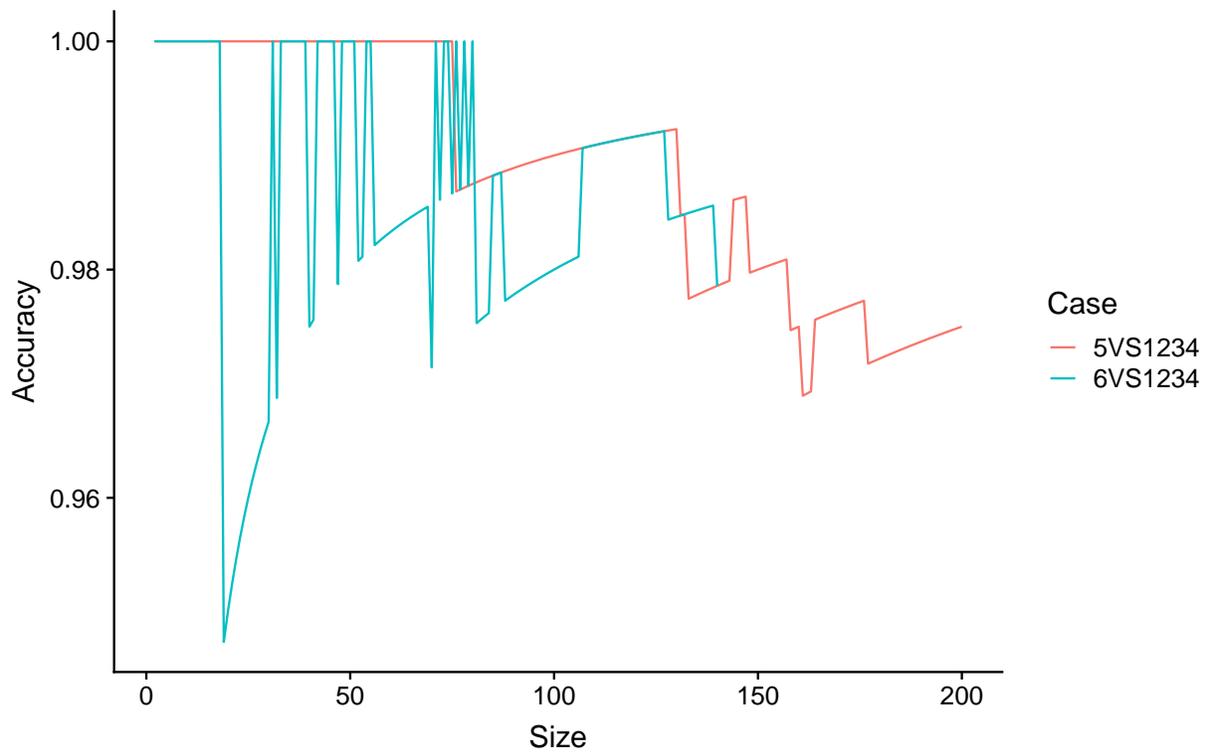


Figure 58: Configuration: *allVS234*. Évolution de la précision du système *BulleText* en fonction de la taille de la base de données.

Table 21: Résultats de la précision des rapprochements au premier rang et parmi le TOP-10 réalisés par la solution *BulleText* avec un apprentissage exploitant 4 projectiles. Taille de la base de données : 800 champs de 200 AKM47

	first_position	top_10
5VS1234	0.77	0.92
6VS1234	0.69	0.91
1VS2345	0.47	0.74
6VS2345	0.77	0.93
1VS3456	0.36	0.67
2VS3456	0.71	0.89

**8.2.2.4 Apprentissage avec cinq projectiles** Il reste que deux cas possibles pour cette configuration. Mais, étant donné que le système *IBIS TRAX3D*, contrairement aux *EVOFINDER* et *BulleText*, ne donne pas la possibilité d'effectuer des comparaisons entre les projectiles de référence de la même arme, aucun cas n'est commun entre *IBIS TRAX3D*, *EVOFINDER* et *BulleText*.

Le tableau 22 représente la comparaison entre *EVOFINDER* et *BulleText*, pour ces deux cas, à savoir *1VS23456* et *6VS12345*.

La comparaison montre une fois de plus l'effet de choix de projectile de test par rapport au groupe utilisé pour l'apprentissage. Les performances du projectile numéro 1 sont toujours les plus modestes, que ce soit pour le système *EVOFINDER* ou le système *BulleText*. Le niveau de performance en mode investigatif du système développé est largement supérieur au système *EVOFINDER*.

La figure 61, représente les courbes *CMC* obtenues, par *EVOFINDER* et *BulleText*, dans ce scénario avec le cas *6VS12345*. Les projectiles de référence sont le premier, le deuxième, le troisième, le quatrième et le cinquième projectile, et le projectile de test est le sixième projectile. Les résultats étaient attendus et n'appellent pas de nouveaux commentaires.

Les courbes *CMC* pour l'autre cas (*1VS23456*), sont disponibles dans l'annexe A1.

**8.2.2.4.1 Analyse des cas de faux rapprochements du système *BulleText* avec un apprentissage exploitant cinq projectiles** Le tableau 23 représente les deux faux rapprochements obtenus avec le système *BulleText* pour le cas *6VS12345*. Le tableau correspondant au cas *1VS23456* est en annexe A3.

Les deux armes qui sont les sources correctes sont immédiatement en rang 2 avec une différence de *LR* inférieure à 20.

Les figures 59 et 60 illustrent visuellement un des cas dont la méthode *BulleText* a proposé un faux rapprochement en position 1.

**8.2.2.4.2 Influence de la taille de la base de données avec un apprentissage exploitant cinq projectiles** La figure 62 donne l'évolution en fonction de la taille de la base de la précision de la méthode pour le cas d'apprentissage effectué par cinq premiers projectiles, et le test effectué avec le sixième projectile (*6VS12345* et *1VS23456*).

Comme observé précédemment, le cas du premier projectile est typique avec une basse des performances jusqu'à moins de 80% en fonction de l'augmentation de la taille de la base. Par contre, lorsque le projectile de test suit les projectiles utilisés en apprentissage, les performances sont hautes (plus de 98%) et très stables.

**8.2.2.4.3 Cas de projectile exploitable fortement endommagé** Le tableau 24 synthétise les résultats obtenus, pour les deux cas de la configuration d'apprentissage par cinq projectiles, en matière de bon classement en première position, et parmi les dix premières positions de la liste de rapprochement issue de la discrimination par la solution *BulleText*.

Table 22: Résultats de discrimination obtenus par: *EVOFINDER* et *BulleText* pour le scénario *projectile-arme* avec un apprentissage exploitant cinq projectiles

	EVOFINDER_22	EVOFINDER_50	BulleText
6VS12345	0.44	0.54	0.99
1VS23456	0.26	0.32	0.75

Table 23: Faux rapprochements obtenus avec le système *BulleText* pour le cas 6VS12345

Expected_firearm	LR_Expected	Predicted_firearm	LR_Predicted	Rank
79	45.724	106	65.376	2
174	65.393	150	66.284	2

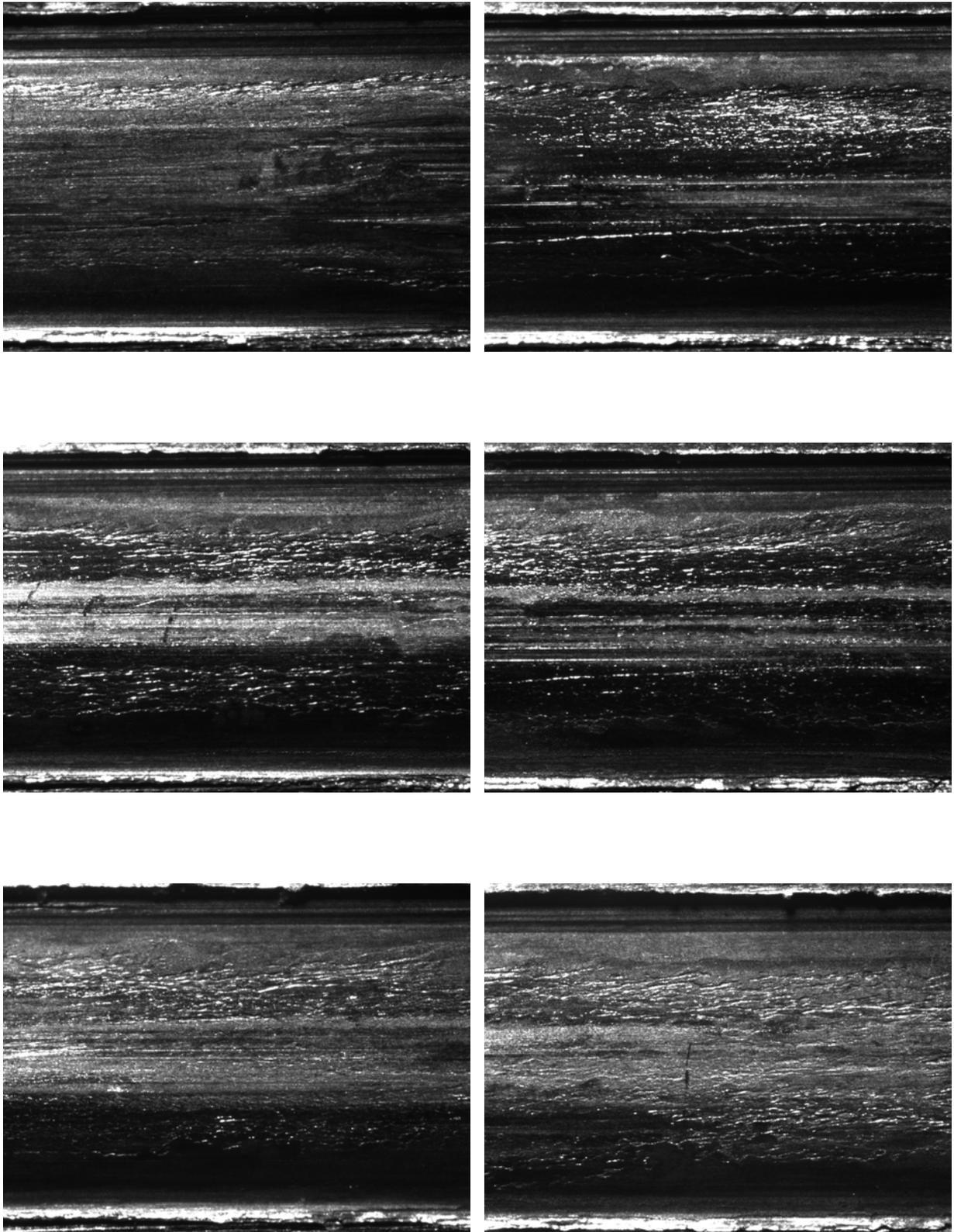


Figure 59: Configuration: *6VS12345*. Fausse exclusion (*2ème* position dans la liste de corrélation) pour le champ *n°1* des projectiles *6* (en bas à droite) et *1, 2, 3, 4* et *5* de l'arme *79*.

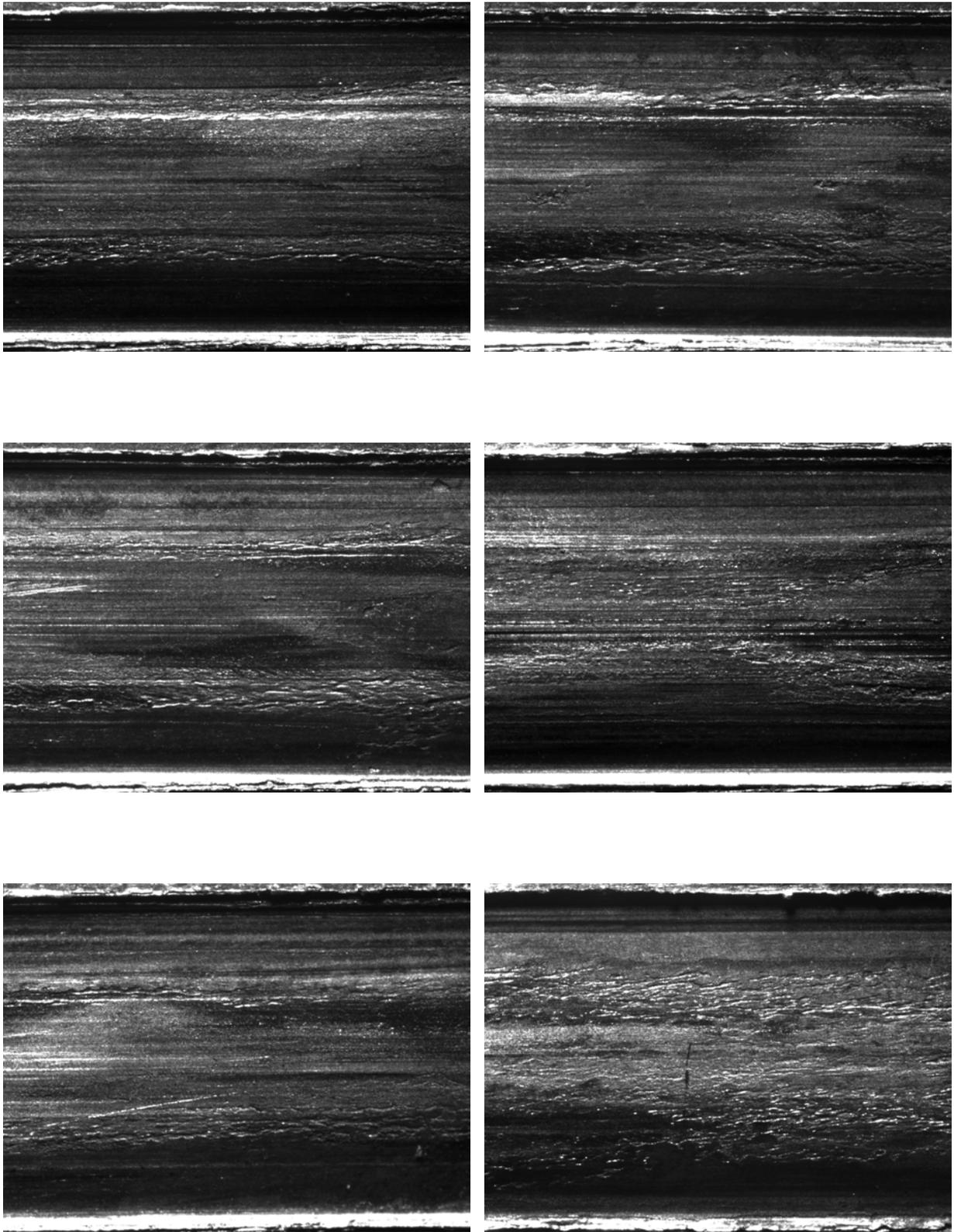


Figure 60: Configuration: *6VS12345*. faux rapprochement entre le champ *n°1* du projectile de test de l'arme 79 (en bas à droite) et le champ *n°1* des projectiles de référence 1, 2, 3, 4 et 5 de l'arme 106.

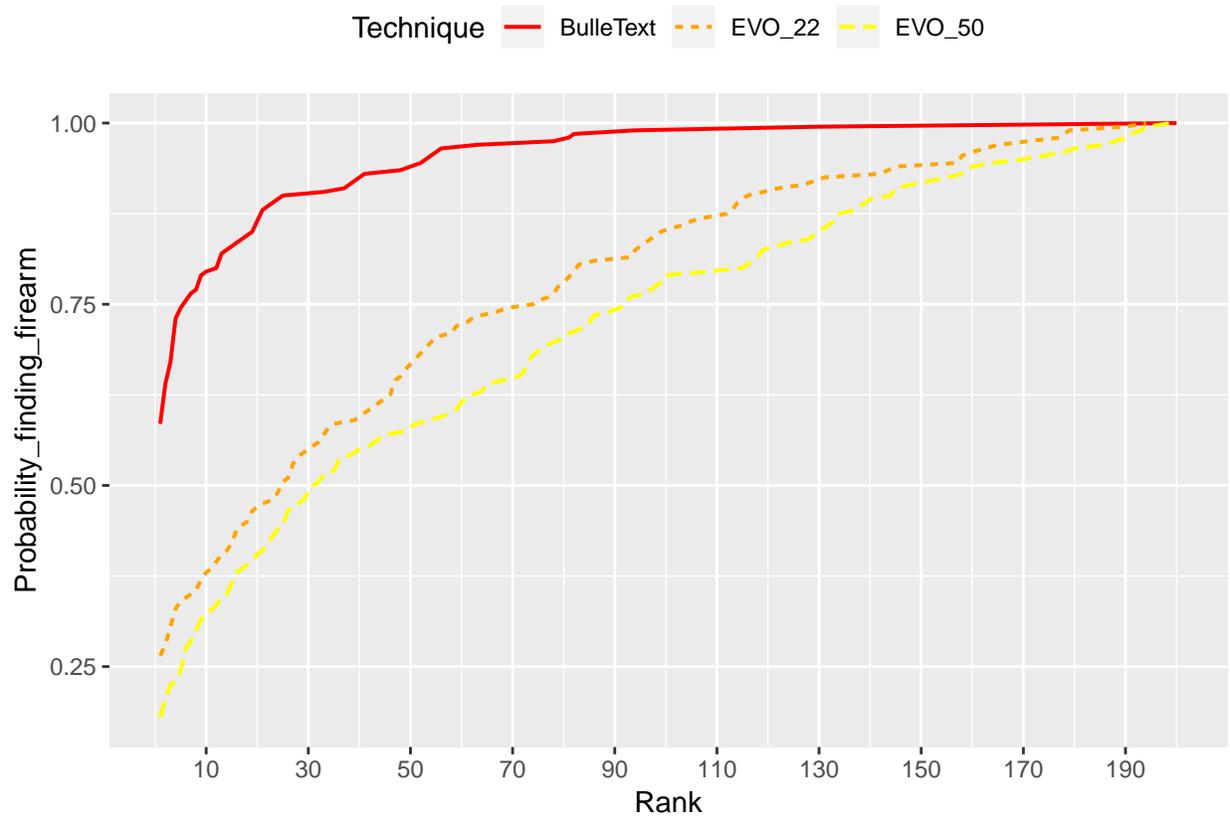


Figure 61: les Courbes *CMC* obtenues par les systèmes *EVOFINDER* (deux variantes), et *BulleText* dans le cas *6VS12345*. Taille de la base de données : 200 AKM47

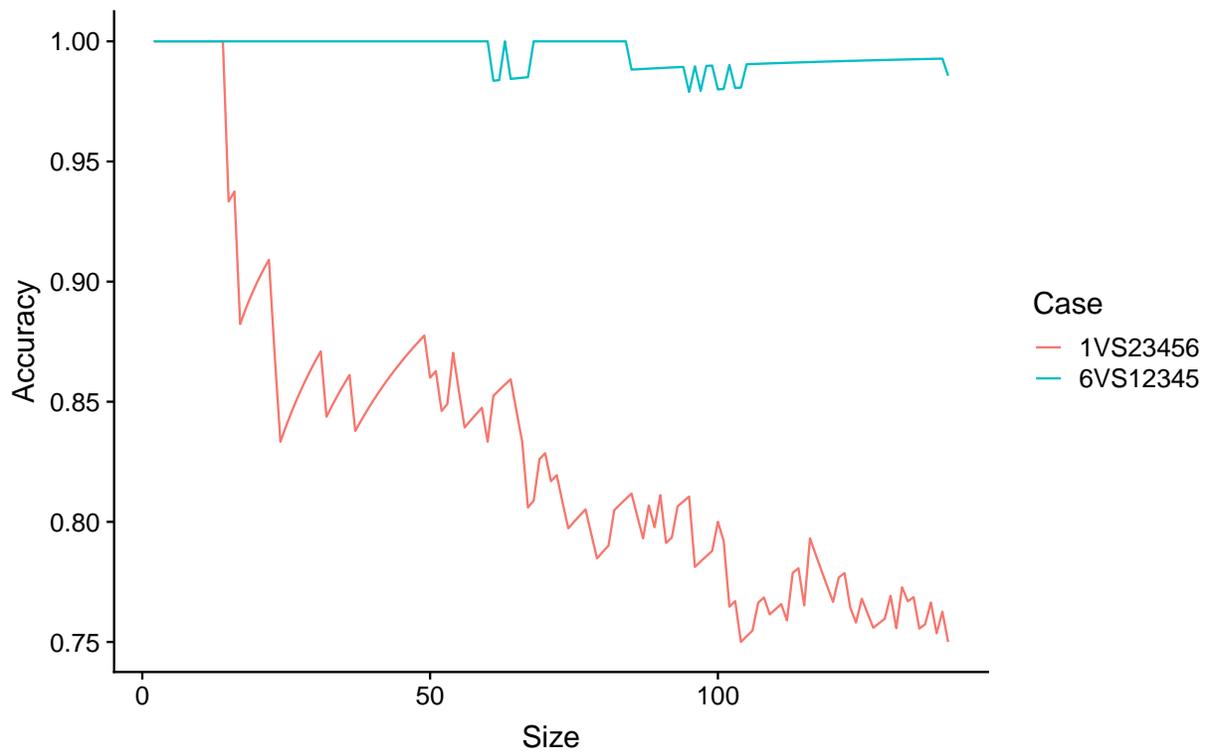


Figure 62: Configuration: *1VS23456* et *6VS12345*. Évolution de la précision dans *BulleText* en fonction de la taille de la base de données.

Table 24: Résultats de la précision des rapprochements au premier rang et parmi le TOP-10 réalisés par la solution *BulleText* avec un apprentissage exploitant 5 projectiles. Taille de la base de données : 800 champs de 200 AKM47

	first_position	top_10
6VS12345	0.78	0.96
1VS23456	0.46	0.72

## 8.3 Discussion des résultats investigatifs

Dans cette section, nous allons reprendre et discuter quelques-unes des observations faites dans ce chapitre.

### 8.3.1 Influence de la hauteur de la fenêtre d'annotation dans le système *EVOFINDER*

Pour les différents scénarios, avec toutes les configurations testées, la hauteur choisie par le soussigné pour l'annotation, à savoir  $0.50\text{ mm}$ , a amélioré significativement le taux de rapprochement, par rapport à celui obtenu par la hauteur suggérée ( $0.22\text{ mm}$ ) dans le manuel d'utilisation du système. La figure 63 résume le pourcentage d'amélioration, due à l'utilisation d'une fenêtre à hauteur de  $0.50\text{ mm}$  au lieu de  $0.22\text{ mm}$  des taux de discrimination, obtenus pour chaque scénario avec toutes les configurations testées.

Dans ce qui suit, et afin de ne pas encombrer les tableaux et les graphes, seules les données d'*EVOFINDER*, avec une fenêtre d'annotation de  $0.50\text{ mm}$ , sont présentées.

### 8.3.2 Comparaison des taux de rapprochement issus d'*EVOFINDER*, *IBIS TRAX3D* et *BulleText*

Les figures (64, 65, 66 et 67) synthétisent de manière comparative les performances obtenues. Il en ressort les observations suivantes :

- Le système *BulleText* est parmi les systèmes testés, celui qui offre le plus grand pouvoir discriminatoire dans toutes les configurations testées.
- Le pouvoir discriminatoire du système *IBIS TRAX3D* est meilleur avec les techniques basées sur l'imagerie 3D, (avec les scores *LEA\_MAX3D* et *Phase\_MAX3D*), qu'avec les techniques basées sur l'imagerie 2D (avec les scores *LEA Max*, *Phase de Point* et *Phase Max*), chose qui peut être expliquée par la qualité de l'acquisition par le microscope confocal et/ou les algorithmes utilisés dans l'extraction de signatures et le calcul des scores de similitude entre deux signatures.
- La précision du système *EVOFINDER* est plus grande que celle du système *IBIS TRAX3D*, basée sur l'imagerie 2D, à savoir pour le système *IBIS TRAX3D* en exploitant les scores *LEA Max*, *Phase de pointe* et *Phase Max*. Cependant, la précision du système en 2D est inférieure que celle du système *IBIS TRAX3D* exploitant l'imagerie 3D.

Il est possible d'expliquer la supériorité de la solution développée par rapport aux deux autres systèmes par le fait qu'elle se démarque sur les trois plans suivants :

- la surface exploitée de l'impression de champs : La solution développée exploite une grande partie (plus de 2 mm de sa hauteur) de l'impression de champs, tandis le système *IBIS TRAX 3D* n'exploite que 1 mm de la hauteur de l'impression de champs, contre une hauteur de 0.2 mm recommandée par le système *EVOFINDER* (ce qui peut expliquer aussi la supériorité d'*IBIS* par rapport à *EVOFINDER*);
- la caractérisation de la signature balistique : A notre connaissance, les deux systèmes *IBIS* et *EVOFINDER* se basent principalement sur la strie comme élément descripteur de la signature balistique. Or la strie, qui représente l'information à l'échelle locale, souffre d'un manque de reproductibilité et son observation dépend fortement des conditions d'éclairage utilisées à l'acquisition. La solution développée utilise la texture directionnelle, qui représente l'information à l'échelle régionale, qui est plus reproductible et moins sensible aux conditions d'acquisition;
- l'utilisation de l'apprentissage supervisé : Les systèmes *IBIS* et *EVOFINDER* n'utilisent pas la modélisation des signatures balistiques des armes par un apprentissage supervisé. Ils se limitent à un calcul du degré de corrélation entre les signatures balistiques. La solution *BulleText* exploite

l'apprentissage supervisé dans la phase de la modélisation de la signature balistique des champs de toutes les armes potentielles saisies dans la base de données. Le rang de chaque arme est obtenu à partir de sa probabilité a posteriori obtenue lors de la phase de prédiction.

Un dernier avantage de la solution *BulleText* est sa capacité de discriminer des projectiles fortement endommagés (dans notre contexte, ne présentant qu'un nombre limité de champs exploitables), chose qui n'est pas facile à réaliser avec les systèmes *IBIS TRAX3D* ou *EVOFINDER*.

Toutefois, il est important de relever que les performances obtenues avec la solution développée sont celles relatives au seul type d'armes étudié. Il est prématuré de généraliser ces performances (y compris en regard des autres systèmes commerciaux) à tous les types d'armes. Une vérification expérimentale sur d'autres calibres et avec différents types de munition s'impose.

Finalement, il aurait été intéressant de réaliser une étude comparative entre les faux rapprochements issus de la solution *BulleText* et ceux éventuellement obtenus par des examinateurs. Mais, en raison de l'absence d'examineurs volontaires durant la pandémie de la COVID-19, cette étude comparative n'a pas pu être réalisée.

### 8.3.3 Influence du premier projectile de référence:

En examinant les tableaux (6, 7, 10, 11, 14, 15, 18, 19 et 22), et les figures (40, 46, 54, 58, 58 et 62) nous constatons comme nous l'avons déjà indiqué l'effet négatif du premier projectile sur la précision du système pour les trois systèmes. Cet effet est plus prononcé lorsque ce premier projectile est utilisé dans le test de transaction que s'il est utilisé dans l'échantillon d'apprentissage. Cette influence peut être expliquée par l'enlèvement de la matière du projectile (donc l'impression) par le canon froid (lors du premier tir) qui peut être différent de l'enlèvement de la matière sur les projectiles subséquents tirés une fois le canon chaud. Sur la base de ce constat, il est recommandé de prendre en considération lors l'examen des projectiles, par un spécialiste ou par un système automatique d'aide à la décision, cet effet adverse du premier projectile.

### 8.3.4 Influence de la distance temporelle entre le projectile de test et le groupe d'apprentissage :

En se référant aux figures (40, 46, 54, 58, 62, 70, 71, et 72) nous pouvons constater que, quelle que soit la composition la taille et la composition du groupe d'apprentissage, le taux de discrimination entre le projectile de test et le groupe d'apprentissage diminue avec la distance temporelle (en termes de nombre de tirs) entre ce projectile et ce groupe, et ceci est valable les trois systèmes.

De ces observations, nous tirons les conclusions suivantes :

- L'ensemble des signatures balistiques laissées par le canon sur un groupe de projectiles ne constitue pas un groupe d'échantillons indépendants, mais doit plutôt être considérée une série temporelle où l'ordre des tirs a un impact.
- Un projectile tiré par une arme qui a déjà été saisie dans la base de données a plus de chance d'être associé à son arme correspondante que dans le cas où cette arme a été saisie dans la base de données après le tir de ce projectile.

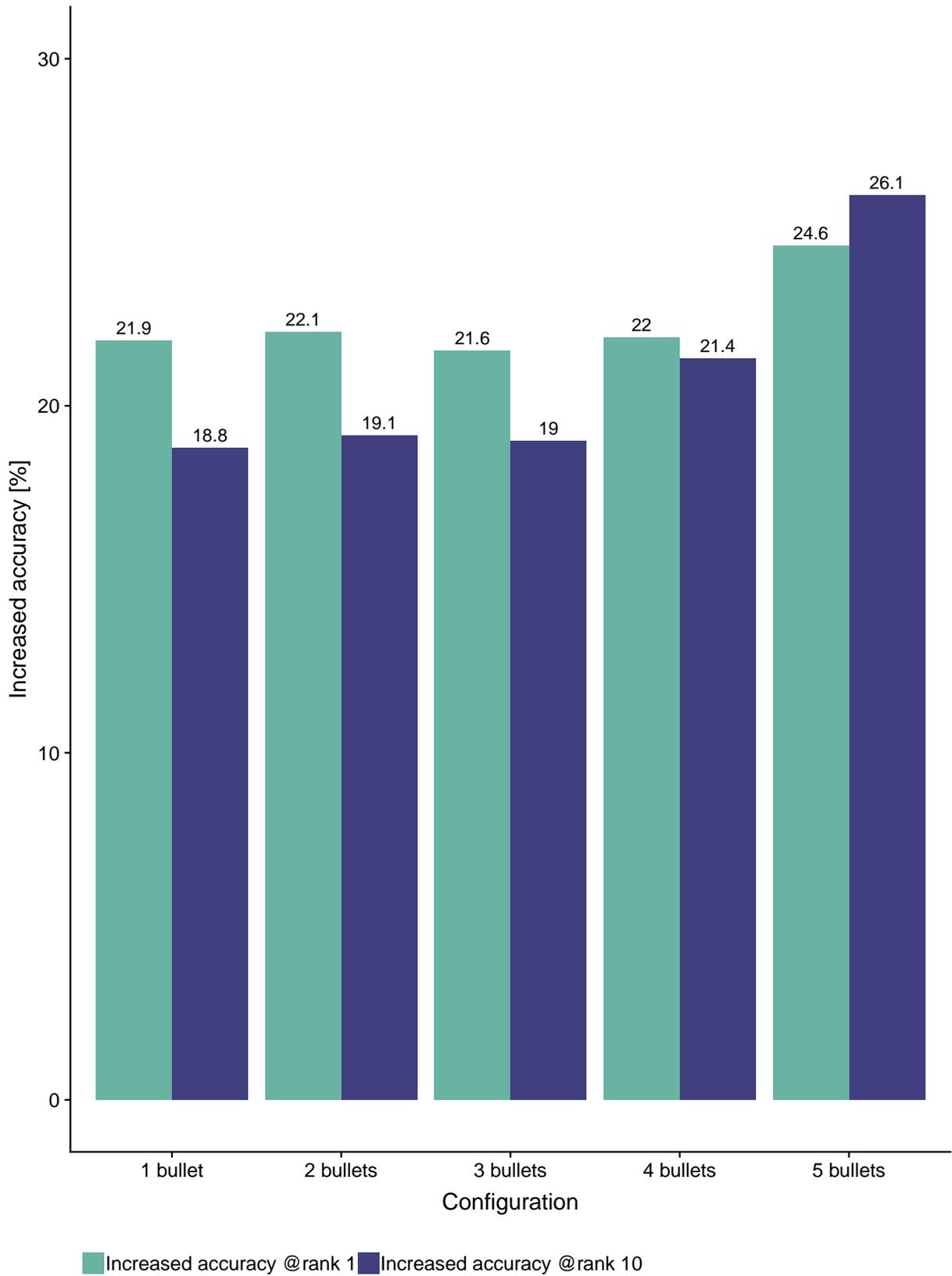


Figure 63: Augmentation du taux de rapprochement au premier rang et dans les 10 premiers, suite au changement de la hauteur de la fenêtre d'annotation du système *EVOFINDER*

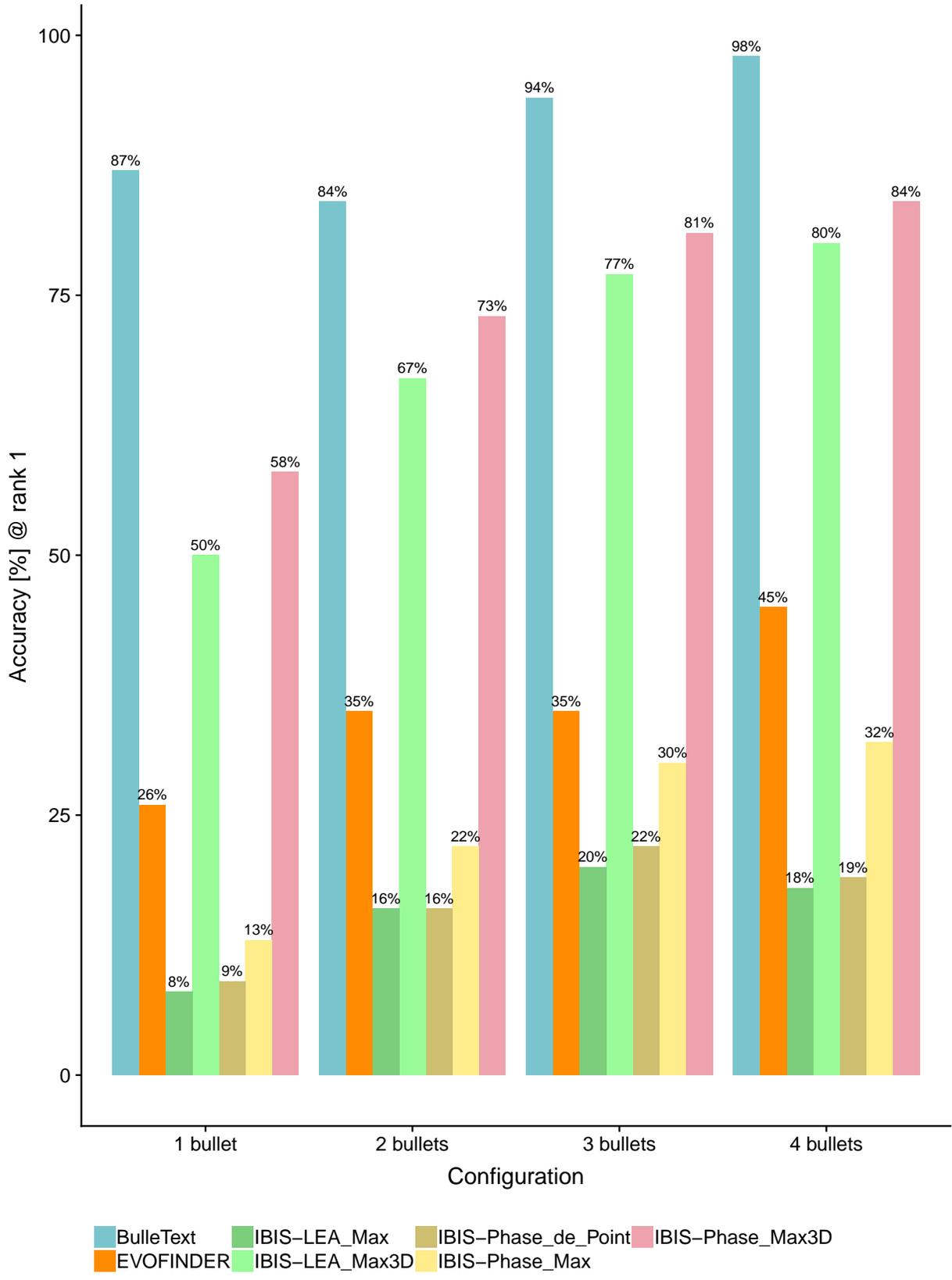


Figure 64: Précisions [en %] obtenues au rang 1 par les systèmes *EVOFINDER*, *IBIS TRAX3D* et *BulleText*, avec les configurations à 1, 2, 3 et 4 projectiles de référence

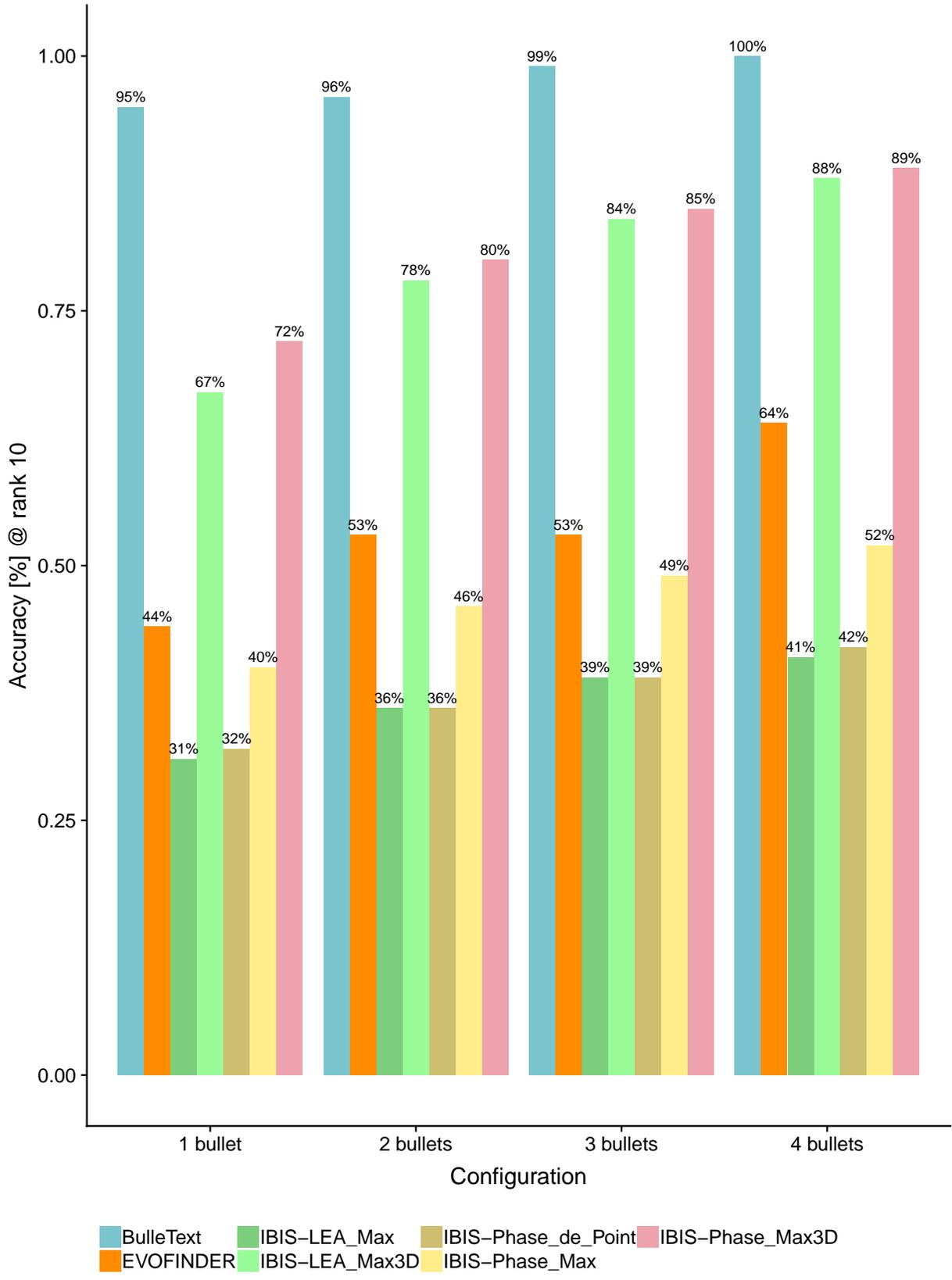


Figure 65: Précisions [en %] obtenues jusqu'au rang 10 par les systèmes *EVOFINDER*, *IBIS TRAX3D* et *BulleText*, avec les configurations à 1, 2, 3 et 4 projectiles de référence

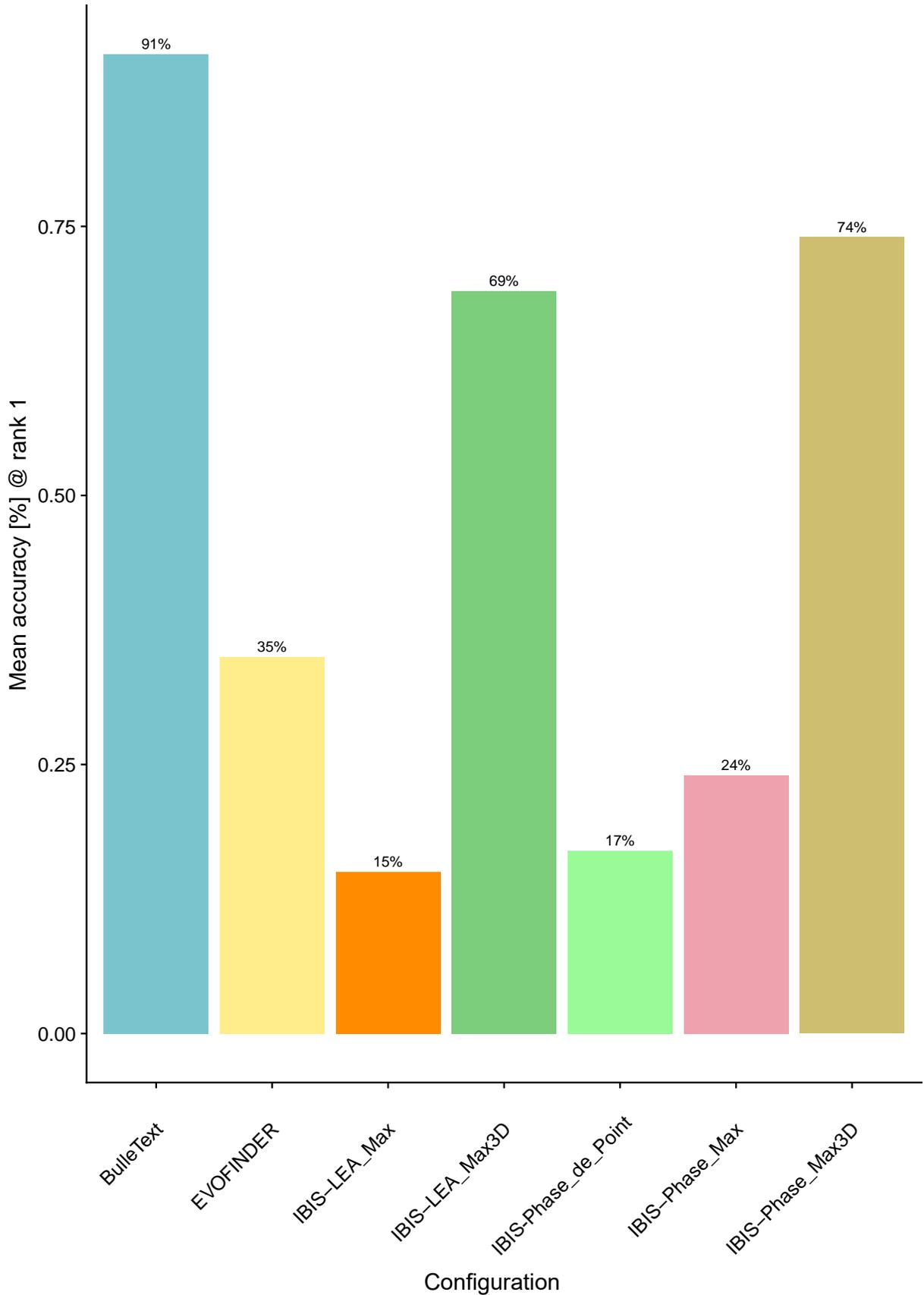


Figure 66: Moyennes des précisions obtenues au rang 1 par les systèmes *EVOFINDER*, *IBIS TRAX3D* et *BulleText*

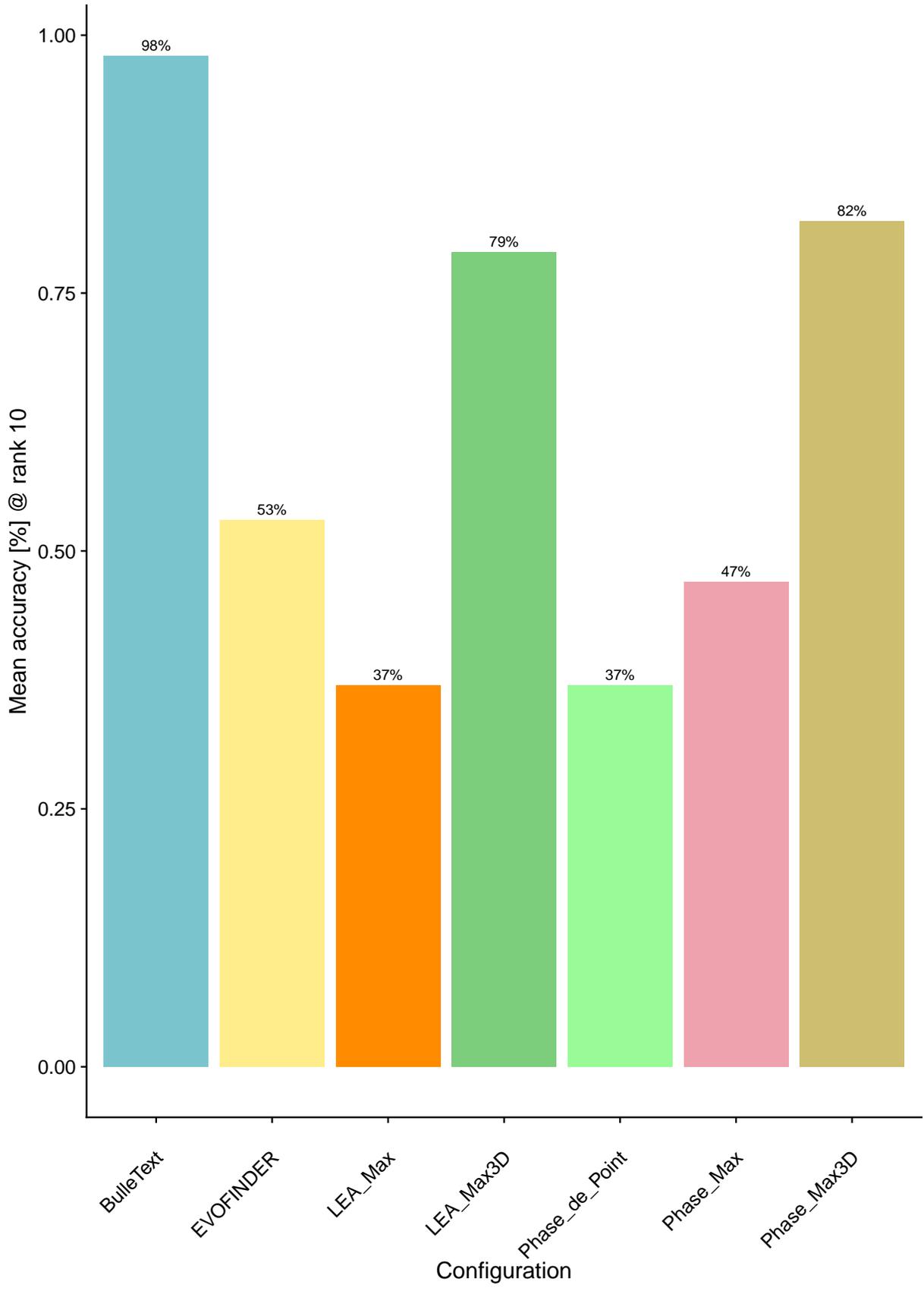


Figure 67: Moyennes des précisions obtenues jusqu'au rang 10 par les systèmes par le système *EVOFINDER*, *IBIS TRAX3D* et *BulleText*

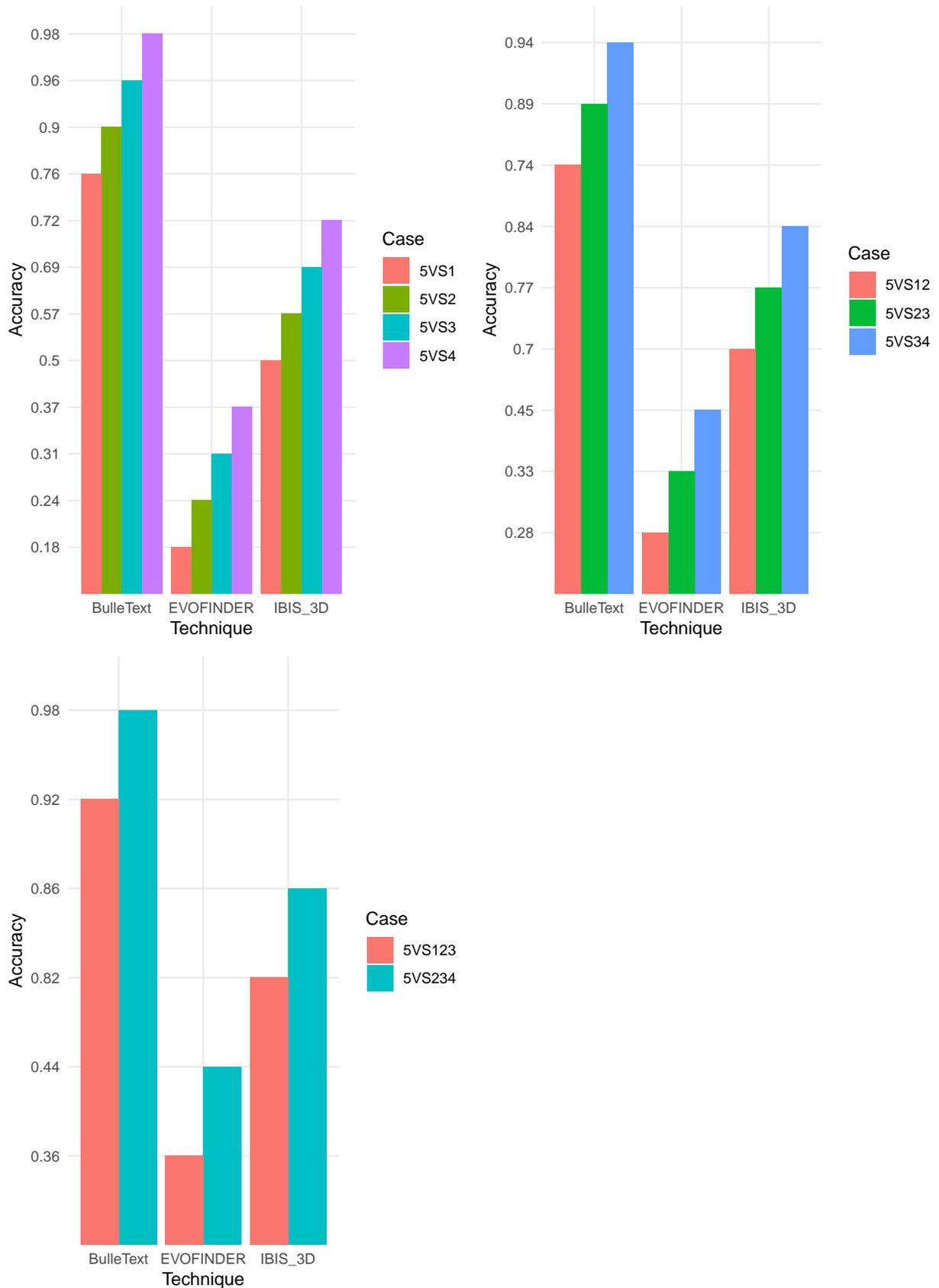


Figure 68: Effet de la distance temporelle (en nombre de tirs) sur le taux de discrimination entre le projectile de test n°5 et les différents groupes d'apprentissage

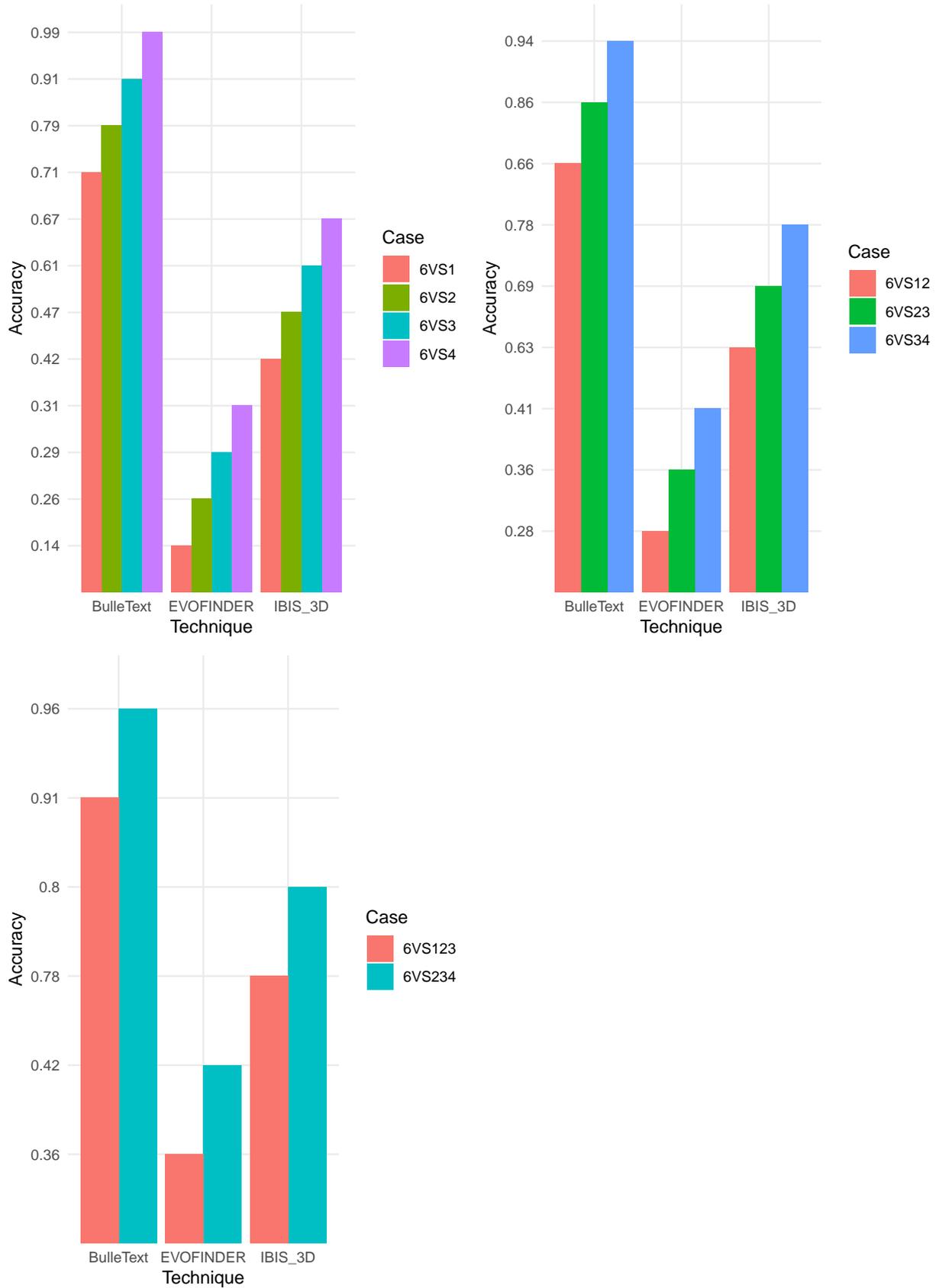


Figure 69: Effet de la distance temporelle sur le taux de discrimination entre le projectile de test n°6 et les différents groupes d'apprentissage

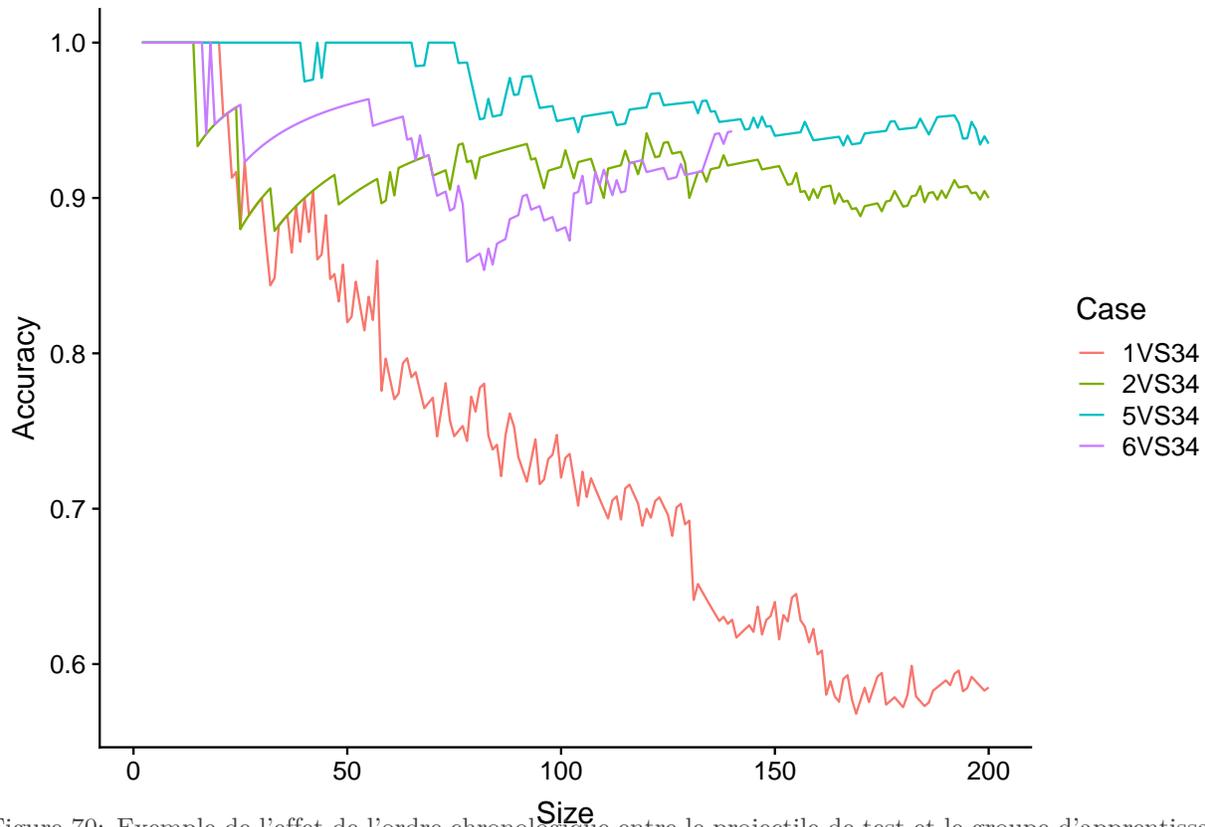
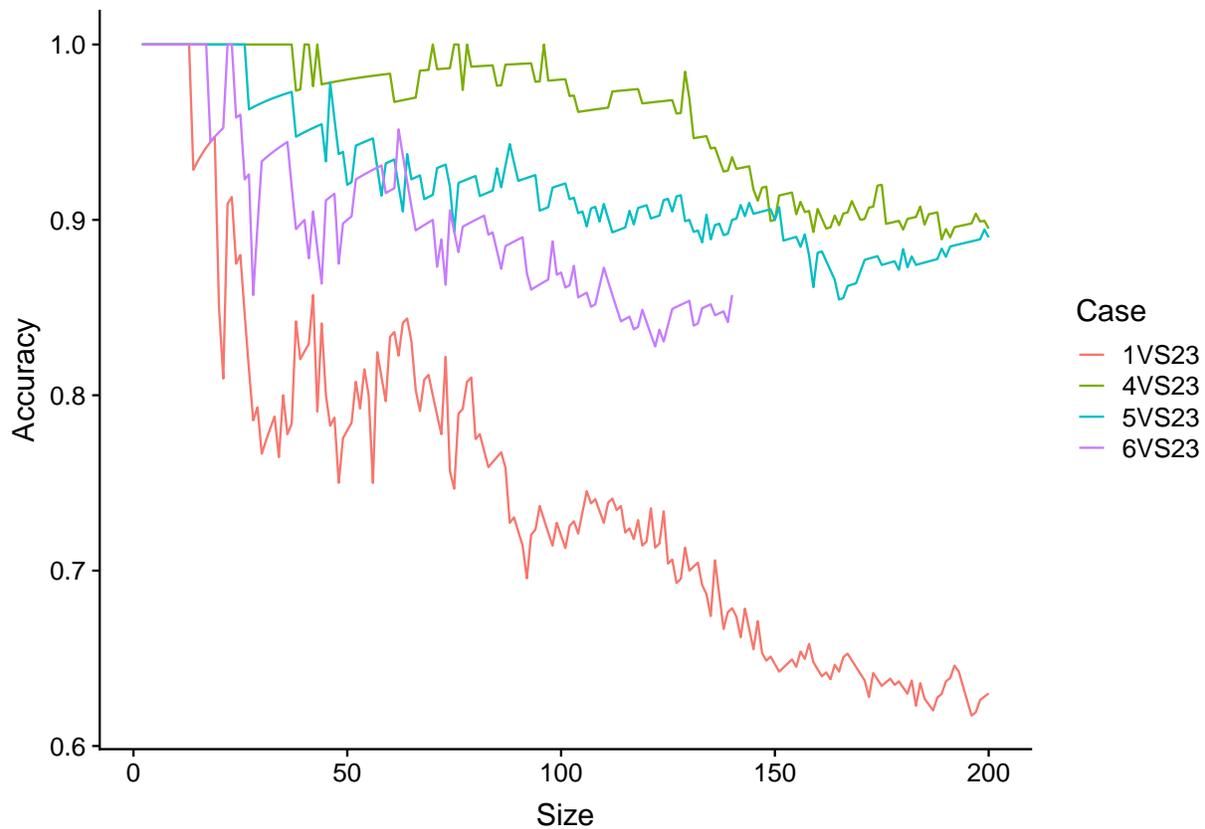


Figure 70: Exemple de l'effet de l'ordre chronologique entre le projectile de test et le groupe d'apprentissage de deux projectiles. En haut: projectiles d'apprentissage (2<sup>ème</sup> et 3<sup>ème</sup>). En bas: projectiles d'apprentissage (3<sup>ème</sup> et 4<sup>ème</sup>).

Top: training set: bullets 2, 3 and 4. Bottom: training set: bullets 3, 4 and 5.

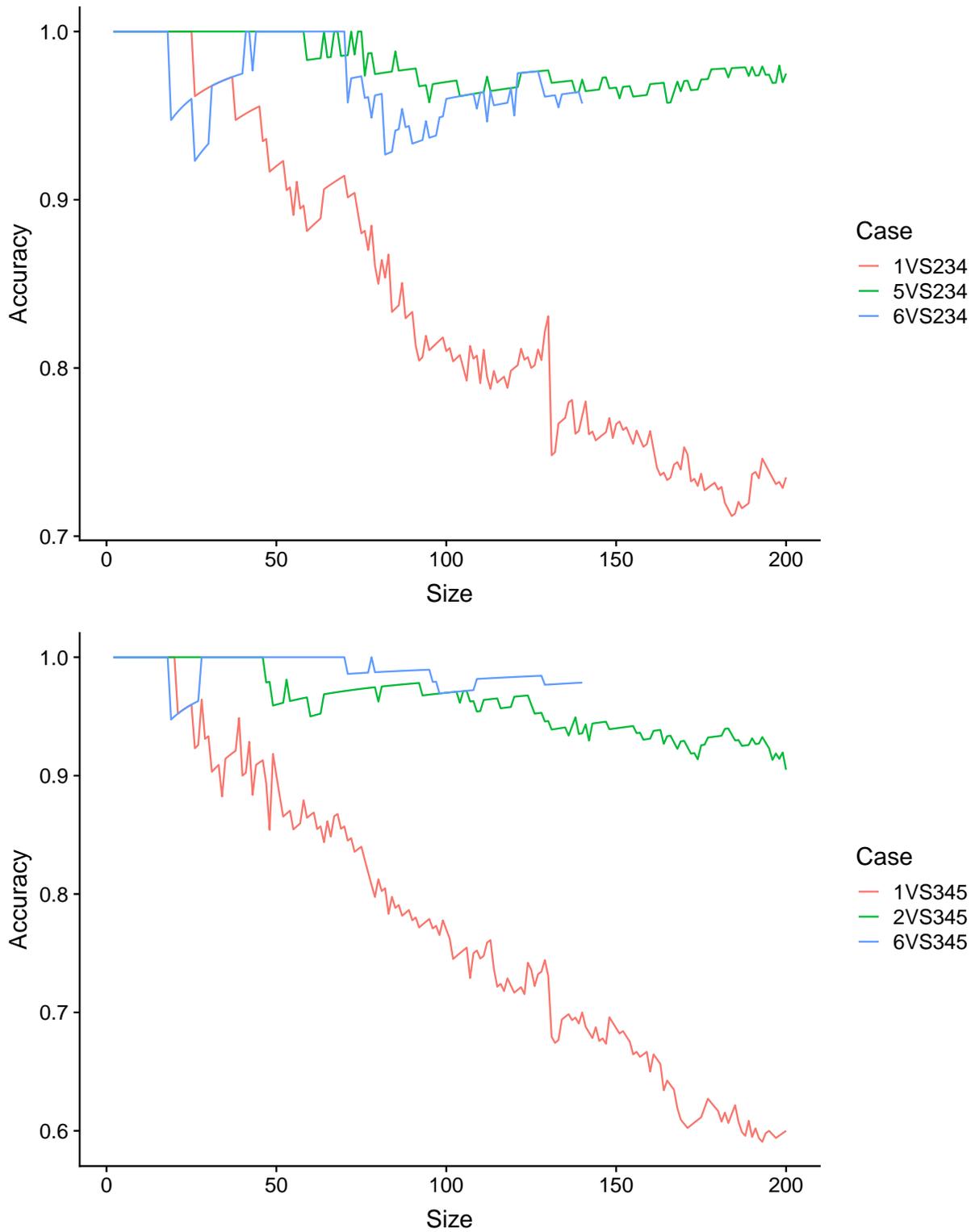


Figure 71: Exemple de l'effet de l'ordre chronologique entre le projectile de test et le groupe d'apprentissage de trois projectiles. En haut: projectiles d'apprentissage (2ème, 3ème et 4ème). En bas: projectiles d'apprentissage (3ème, 4ème et 5ème).

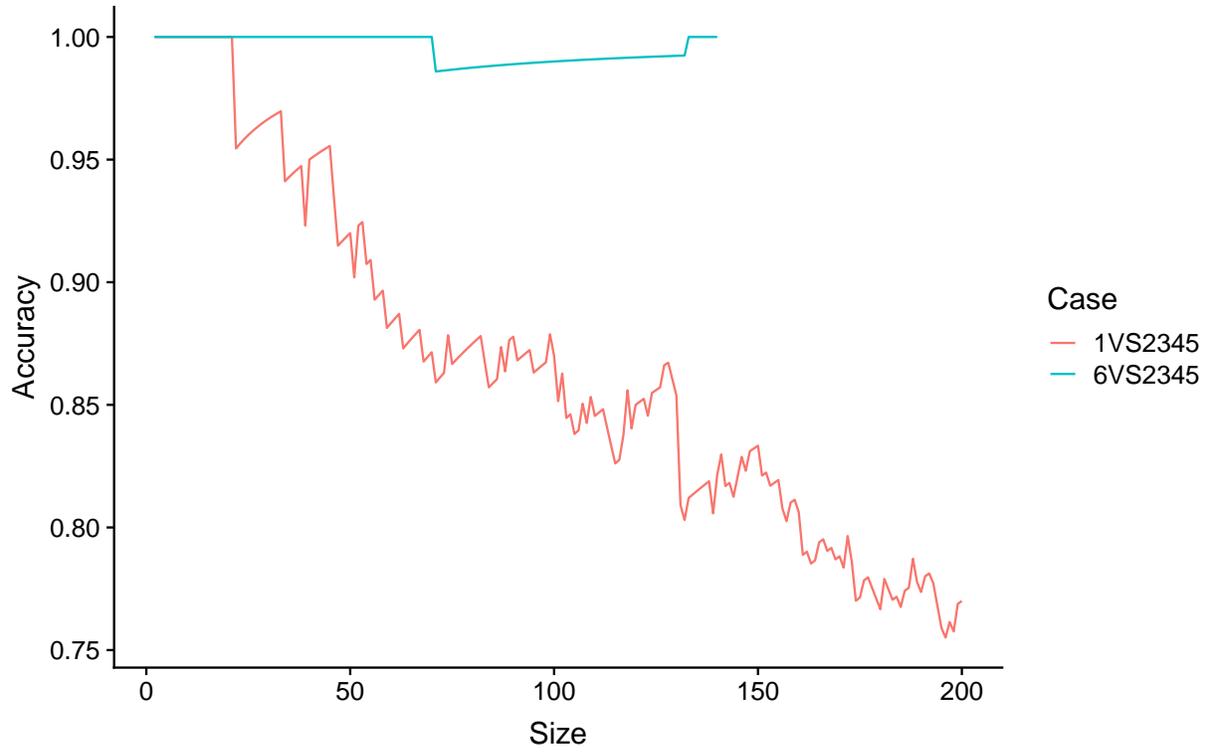


Figure 72: Exemple de l'effet de l'ordre chronologique entre le projectile de test et le groupe d'apprentissage de quatre projectiles

## 9 Les performances en mode évaluatif du système *BULLETEXT*

Le mode investigatif, présenté dans le chapitre précédent, fait souvent partie des premières démarches d'une enquête criminelle. Il consiste à collecter et rassembler et toutes les traces disponibles liées à un incident, de suggérer des pistes d'enquête (notamment une liste d'armes potentielles) et par la suite de combiner ces informations avec d'éventuelles déclarations. Cette phase vise à générer des hypothèses ordonnées selon leur pertinence dans le cadre du dossier. Cette information est fournie à l'enquête tactique, qui elle la croise avec d'autres informations, concordantes et discordantes. L'ensemble de ces informations permet de fixer quelles sont les hypothèses les plus pertinentes pour l'évaluation d'un cas.

Le présent chapitre est consacré à l'investigation des performances de la méthode développée dans l'autre mode, celui dans un *cadre évaluatif*.

On parle de *cadre évaluatif*, lorsque les résultats de l'examen balistique seront potentiellement présentés comme moyen de preuve devant une autorité, plus particulièrement lorsqu'une personne d'intérêt est potentiellement mise en cause en lien avec une arme d'intérêt. Conformément aux directives de l'ENFSI, il est attendu que ces résultats soient communiqués sous forme d'un rapport de vraisemblance (l'abréviation *LR* sera utilisée pour y référer) (Aitken Colin Graeme Girwood 2004). En d'autres termes nous cherchons à estimer la valeur du rapport entre la probabilité d'observer les traces respectivement sur la balle de question et sur les projectiles de références (observations résumées par  $E$ ), si celles-ci ont été tirées par la même arme (hypothèse  $H_p$ ) par rapport à la probabilité des mêmes observations si le projectile de question a été tiré par une autre arme inconnue (hypothèse  $H_d$ ). Le *LR* est donc le rapport entre  $P(E/H_p)$  et  $P(E/H_d)$ .

Ce chapitre est divisé en trois parties. La première partie présente la méthode de calcul du *LR* pour les différentes configurations d'apprentissage adoptées. Les résultats obtenus pour ces configurations font l'objet de la deuxième partie. La dernière partie est réservée pour la discussion des résultats dans ce mode évaluatif.

### 9.1 Méthode de calcul du *LR*

Pour rappel, pour chaque arme disponible, les données brutes suivantes sont obtenues :

- Des tirs de test (au moins trois) sont réalisés avec l'arme, afin de récupérer les projectiles de référence de cette arme.
- Pour chaque projectile de référence, une acquisition en 2D des impressions de champs est effectuée.
- Les images des impressions du même champ sont spécifiées sur l'ensemble des projectiles de référence.
- La signature balistique est extraite de chaque image grâce à l'algorithme développé dans cette recherche.

Lorsqu'un nouveau cas est soumis, par exemple lorsqu'un nouveau projectile de source inconnue est comparé à des projectiles de référence d'une arme putative, l'ensemble des acquisitions 2D du projectile de question sont récupérées ainsi que leurs signatures balistiques. Il en va de même pour les projectiles obtenus de l'arme en question.

Le calcul du *LR* associé à une comparaison entre un projectile de source inconnue et d'une arme putative nouvelle rentrant dans la base s'effectue de la manière suivante :

- Sur l'ensemble des armes dans la base de données (y compris la nouvelle arme de question arrivant en entrée), la modélisation des champs est effectuée par la technique de *PCA* (*Principal Component Analysis*), *RDA* (*Regularized Discriminant Analysis*) retenue. Cela signifie que l'ensemble de l'apprentissage est reconduit à l'arrivée de chaque nouvelle arme. À la suite de cette étape de modélisation, chaque champ  $j$  de chaque arme  $k$  a son propre modèle  $ML_{jk}$ .
- Par l'application du modèle prédictif *RDA*, les probabilités a posteriori  $P(ML_{jk}|S_i)$  entre chaque signature balistique  $S_i$  du projectile de question et les modèles des champs  $ML_{jk}$  de chaque arme  $k$  ( $j=1,2,3$  ou  $4$ ) sont calculés. Parmi les  $k$  armes se trouve la nouvelle arme de question.

- Pour chaque phase, la somme pondérée des probabilités a posteriori est calculée.

$$\text{Probabilité de phase}_1 = PF_{1k} = P(S_1, ML_{1k}) + P(S_2, ML_{2k}) + P(S_3, ML_{3k}) + P(S_4, ML_{4k})$$

$$\text{Probabilité de phase}_2 = PF_{2k} = P(S_1, ML_{2k}) + P(S_2, ML_{3k}) + P(S_3, ML_{4k}) + P(S_4, ML_{1k})$$

$$\text{Probabilité de phase}_3 = PF_{3k} = P(S_1, ML_{3k}) + P(S_2, ML_{4k}) + P(S_3, ML_{1k}) + P(S_4, ML_{2k})$$

$$\text{Probabilité de phase}_4 = PF_{4k} = P(S_1, ML_{4k}) + P(S_2, ML_{1k}) + P(S_3, ML_{2k}) + P(S_4, ML_{3k})$$

- La probabilité a posteriori d'une arme  $k$  d'avoir tiré le projectile de question est égale à la plus grande somme pondérée obtenue.

$$P(H_k|E) = P(H_k|(S_1, S_2, S_3, S_4)) = \text{Max}(PF_{ik})$$

- Le rapport de vraisemblance  $LR_k$  de l'arme  $k$  est calculé à partir des probabilités a posteriori  $P(H_k|E)$  par l'équation :

$$LR_k = \frac{P(E|H_k)}{P(E|\bar{H}_k)} = \frac{P(H_k|E) P(\bar{H}_k)}{P(\bar{H}_k|E) P(H_k)} = \frac{P(H_k|E)}{1 - P(H_k|E)} (N_{AF} - 1)$$

Où  $P(S_i, ML_{jk})$  est la probabilité a posteriori  $P(H_{i,jk}|E)$ , et  $H_{i,jk}$  est l'hypothèse que le champ  $j$  de l'arme suspecte  $k$  est à l'origine de l'impression de champ  $i$  du projectile récupéré.

Ainsi, sur la base des 200 armes à disposition, il est possible d'extraire itérativement un des projectiles et de le considérer comme projectile de question et de le comparer avec l'ensemble des armes à disposition en base. Pour 199 armes, il est établi que le projectile n'a pas été tiré par ces sources ( $Hd$ ) et pour une transaction nous avons la source établie ( $Hp$ ).

### 9.1.1 Sélection des configurations d'apprentissage

Dans ce chapitre, et afin d'être au plus proche des pratiques des laboratoires forensiques, les configurations exploitant deux projectiles d'apprentissage n'ont pas été prises en considération. En effet, en pratique, au moins trois tirs de référence sont effectués pour chaque arme saisie. Afin d'homogénéiser la taille des populations, les configurations dont le sixième projectile fait partie ne seront pas également prises en considération, car cela ne concerne que cent quarante parmi les deux cents armes de la base de données.

Ainsi, les huit configurations d'apprentissage (et le test correspondant) suivantes ont été retenues :

- Avec trois projectiles d'apprentissage :  $4VS123$ ,  $5VS123$ ,  $1VS234$ ,  $5VS234$ ,  $1VS345$  et  $2VS345$ .
- Avec quatre projectiles d'apprentissage :  $5VS1234$  et  $1VS2345$

Pour chacune de ces configurations, la base de données de 200 armes nous permet 200 transactions sous  $Hp$  et  $3.98 \times 10^4$  transactions sous  $Hd$ . Au total, la recherche s'appuie donc sur un total de 1600 transactions sous  $Hp$  et  $3.184 \times 10^5$  transactions sous  $Hd$ .

### 9.1.2 Les mesures des performances forensiques de la méthode

L'efficacité d'une méthode dans cette tâche évaluative se manifeste par des valeurs de  $LR$  grandes (supérieures à 1) dans la comparaison entre les traces laissées par la même source et de faibles valeurs de  $LR$  (inférieures à 1) lors de la comparaison entre les traces laissées par des différentes sources. Dans le présent travail de recherche, la mesure de l'efficacité de *BulleText*, va être représentée par les courbes *DET* (Martin et al., n.d.) et des *Tippett plots* (S. 1996). Couplés à ces représentations graphiques, les taux de transactions ayant conduit à des  $LR$  pointant en faveur de la mauvaise hypothèse sont comptabilisés. On parle donc

du pourcentage des cas où le  $LR$  sous  $H_p$  est inférieur à 1  $RMED$  (pour *rate of misleading evidence in favour of the defence*) et le pourcentage des cas où le  $LR$  sous  $H_d$  est supérieur à 1  $RMEP$  (pour *rate of misleading evidence in favour of the prosecutor*). La somme de ces deux taux donne l'erreur forensique totale, nommée  $RME$  (pour *rate of misleading evidence*). Nous parlerons de taux d'erreur forensique lorsqu'il sera fait référence de manière globale aux taux  $RMEP$ ,  $RMED$  ou  $RME$ .

Étant donné qu'il est possible d'obtenir des rapports de vraisemblance supérieurs à 1 pour des sources qu'on sait qu'elles ne sont pas à l'origine de la trace (*Known non-match : KNM*) et d'obtenir également un  $LR$  inférieur à 1 pour la source dont on sait être à l'origine de la trace (*Known match : KM*), nous introduisons ci-après deux mesures supplémentaires pour caractériser les performances du système. Elles s'apparentent à un calcul des taux traditionnels de faux positifs et de faux négatifs, mais plaçant un seuil décisionnel sur le rapport de vraisemblance fixé de la manière suivante:

- Sont comptés comme des faux négatifs ( $FN$ ) les cas où les  $LR$ , obtenus sous l'hypothèse  $H_p$ , sont inférieurs au maximum des  $LR$  observés lors des comparaisons entre les projectiles tirés par des armes différentes ( $\max(LR/H_d)$ ).
- Sont comptés comme faux positifs ( $FP$ ) les cas où les  $LR$ , obtenus sous l'hypothèse  $H_d$ , sont supérieurs au minimum des  $LR$  observés ( $\min(LR/H_p)$ ) lors des comparaisons entre les projectiles tirés par les mêmes armes.

Ces deux taux ( $FP$  et  $FN$ ) permettent d'envisager un régime d'utilisation du système où tous les  $LR$  obtenus entre les deux bornes (entre  $\min(LR/H_p)$  et  $\max(LR/H_d)$ ) sont considérés avec prudence étant donné l'occurrence observée de cas pointant en faveur de la fausse hypothèse dans ces cas.

Dans les situations où l'examineur est appelé à donner une opinion sur les chances a posteriori, comme il est pratiqué dans certains pays, il est possible de donner une réponse dite *inconclusive* ou indéterminée du système dans ces cas. Le pourcentage total ( $FP$  et  $FN$ ) donne la proportion des cas dans lesquels une telle réponse serait fournie.

La figure (73) illustre comment l'ensemble de ces mesures de performance sont obtenues. La courbe en bleu foncé représente la distribution en  $\log_{10}$  des  $LR$  obtenus sous l'hypothèse  $H_p$ , la courbe en bleu clair est celle des  $LR$  obtenus sous l'hypothèse  $H_d$ .

### 9.1.3 Calibration des $LRs$

La littérature (Ramos-Castro, Gonzalez-Rodriguez, and Ortega-Garcia, n.d.) (Meuwly, Ramos, and Haraksim 2017) recommande que les résultats de l'examen des projectiles soient transmis sous la forme d'un rapport de vraisemblance calibré sur la base des données empiriques obtenues.

Deux méthodes de calibration ont été choisies, à savoir la régression logistique et *Pool Adjacent Violators Algorithm (PAVA)* (Zadrozny and Elkan 2002), pour calibrer les valeurs des rapports de vraisemblance obtenus de la classification par  $RDA$ . C'est uniquement le rapport de vraisemblance calibré qui sera potentiellement transmis à l'autorité à l'issue des transactions. Toutefois, afin de montrer l'apport de la calibration et de contraster les deux méthodes concurrentes, les résultats seront présentés avant et après calibration.

La qualité de la calibration du rapport de vraisemblance, effectuée par ces deux méthodes, va être mesurée par les courbes dites  $ECE$  (*Empirical Cross-Entropy*) et les métriques associées (Ramos and Gonzalez-Rodriguez 2013).

## 9.2 Application de la théorie de la décision

La principale mission d'un examineur en science forensique est d'effectuer les défrent examens et analyses sur l'indice matériel et d'évaluer sa valeur probante sous la lumière des résultats obtenus pour les hypothèses des parties. Donc, en général l'examineur est appelé à présenter au mandant le rapport de probabilité des observations-vraisemblance.

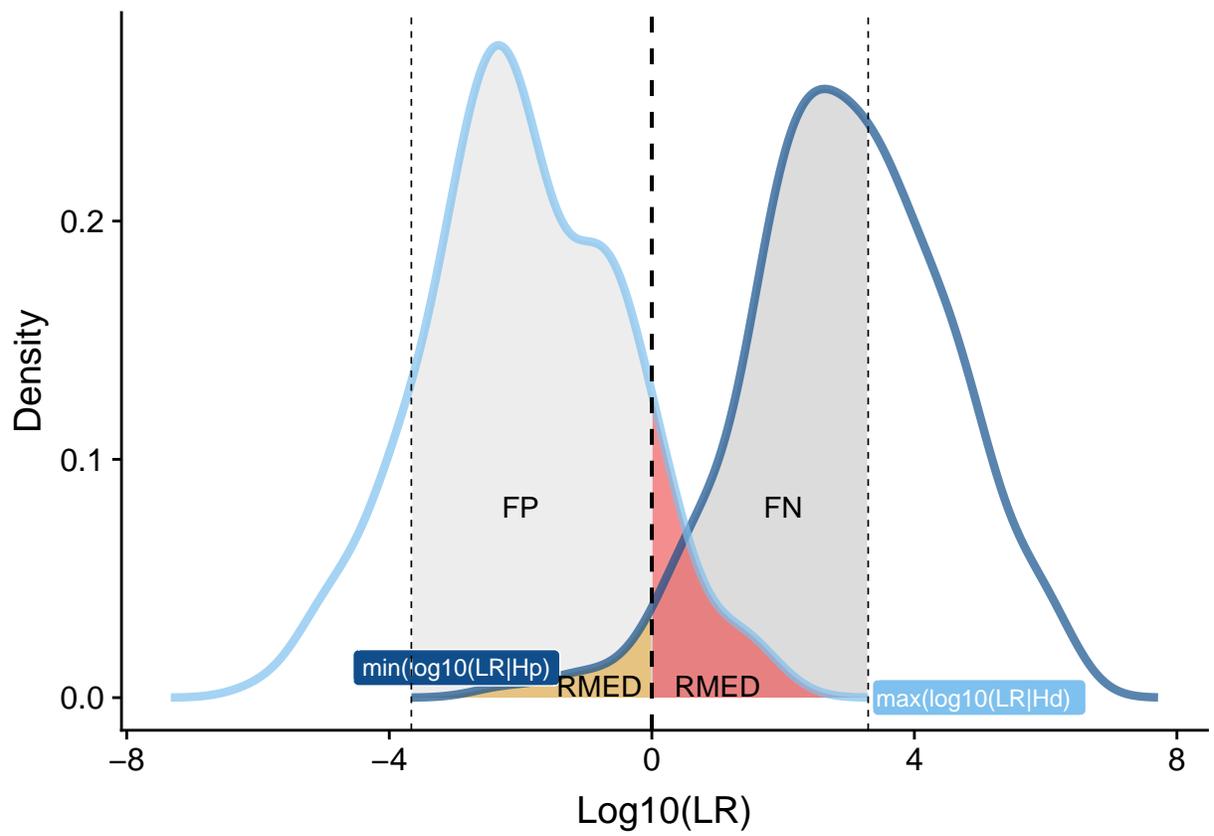


Figure 73: Courbes illustratives des densités de  $\log_{10}(LR)$  et des taux d'erreur  $RMEP$ ,  $RMED$ ,  $FP$  et  $FN$ .

Néanmoins, au lieu de se limiter au niveau de la présentation de la force probante de l'indice matériel via le rapport de vraisemblance, il existe des systèmes judiciaires de certains pays qui obligent l'examineur de s'exprimer sur les hypothèses, donc sur les chances a posteriori.

Nous allons explorer cette possibilité en posant un certain nombre d'hypothèses. Selon Biedermann et ses collègues, il est possible de conclure une individualisation si et seulement si l'inégalité suivante est vérifiée :

$$\log\left[\frac{P(E|H_p,I)}{P(E|H_d,I)}\right] > \log\left[\frac{L(C_\alpha)}{L(C_\beta)}\right] + \log\left[\frac{P(H_d|I)}{P(H_p|I)}\right]$$

dont  $\frac{L(C_\alpha)}{L(C_\beta)}$  représente le rapport de perte, ou le rapport entre  $L(C_\alpha)$ , le coût d'une fausse discrimination et  $L(C_\beta)$ , le coût d'une fausse exclusion.

Conscients que la fixation de cette valeur fait appel à des considérations de valeur, que Biedermann et ses collègues estiment en dehors du rôle de l'expert-e forensique, nous allons affecter la valeur de 10 à ce rapport afin de progresser dans le raisonnement.

Le terme  $\frac{P(H_d|I)}{P(H_p|I)}$  représente le rapport entre les chances a priori. Dans le cadre du présent travail ce terme est égal à  $N_{AF} = 200$ . Il va de soi que cette valeur dépend des circonstances spécifiques d'un dossier et que la valeur proposée plus haut ne reflète qu'une situation théorique où 200 armes sont considérées chacune avec la même probabilité a priori d'être à la source du projectile de question.

En admettant les deux conditions plus haut, afin de conclure une individualisation entre une arme, saisie dans la base de données, et un projectile de question, il est nécessaire que:

$$\log(LR) > \log(10) + \log(200) \approx 3.30$$

### 9.3 Résultats

Le tableau 25 donne les résultats obtenus en termes de taux d'erreur forensique pour toutes les configurations retenues.

Table 25: *RMEP*, *RMED* et *RME* obtenus en pourcentage avant (*\_noCalib*) et après la calibration respectivement par la méthode de régression logistique (*\_LogReg*) et par la méthode *PAVA* (*\_PAVA*)

	<i>RMEP_noCalib</i>	<i>RMEP_LogReg</i>	<i>RMEP_Pava</i>	<i>RMED_noCalib</i>	<i>RMED_LogReg</i>	<i>RMED_Pava</i>	<i>RME_noCalib</i>	<i>RME_LogReg</i>	<i>RME_Pava</i>
1VS345	1.93	6.53	8.90	17.5	9.0	5.5	19.43	15.53	14.40
1VS234	1.83	3.83	4.10	13.5	6.5	5.0	15.33	10.33	9.10
1VS2345	1.65	3.11	5.86	9.0	5.0	2.0	10.65	8.11	7.86
2VS345	0.99	0.92	1.33	3.0	3.0	0.5	3.99	3.92	1.83
5VS123	1.29	0.76	0.67	1.5	1.5	1.5	2.79	2.26	2.17
4VS123	1.06	0.60	1.23	1.5	2.5	0.5	2.56	3.10	1.73
5VS234	0.76	0.52	1.52	1.5	1.5	0.0	2.26	2.02	1.52
5VS1234	0.82	0.38	0.82	0.0	1.5	0.0	0.82	1.88	0.82

Globalement les taux d'erreur forensique diminuent grâce à la calibration et de manière plus marquée pour la méthode *PAVA* que la méthode de régression logistique. Si les différentes configurations sont contrastées, nous notons, comme nous l'avons fait en mode investigatif, que les transactions impliquant le projectile numéro 1 ont des taux d'erreur les plus élevés. Finalement, plus l'échantillon d'apprentissage est large (4 par rapport à 3), plus les taux d'erreur se réduisent comme attendu. Pour prendre l'exemple du projectile numéro 1, le *RME\_Pava* passe de 14.4% à 7.86%. Aussi la distance entre ce projectile par rapport au groupe d'apprentissage (en termes de nombre de tirs) impacte sur le taux d'erreur (de 9.10% pour 1VS234 avec l'échantillon d'apprentissage faisant directement suite au premier tir de question à un taux de 14.4% pour 1VS345 lorsqu'un projectile de plus est ajouté entre le tir de question et l'échantillon d'apprentissage).

Le tableau 26 présente les taux de faux négatifs et de faux positifs obtenus avant et après la calibration du *LR* par les deux méthodes.

Table 26: Taux des faux positifs (*FP*) et de faux négatifs (*FN*) en pourcentage, obtenus avant (*\_noCalib*) et après la calibration logistique (*\_Logis*) et par la méthode *PAVA* (*\_PAVA*)

	FN_NoCalib	FN_Logis	FN_Pava	FP_NoCalib	FP_Logis	FP_Pava
1VS345	65.5	65.5	60.5	46.45	46.45	29.28
1VS234	53.0	53.0	41.5	25.28	25.28	15.03
1VS2345	52.5	52.5	45.5	33.80	33.80	18.54
2VS345	21.5	21.5	15.5	13.68	13.68	1.33
5VS123	14.5	14.5	12.0	3.38	3.38	0.67
4VS123	14.5	14.5	10.0	5.03	5.03	1.23
5VS234	5.5	5.5	3.5	1.52	1.52	0.20
5VS1234	4.0	4.0	3.0	0.82	0.82	0.38

Les mêmes observations faites plus haut se répètent ici. Nous notons l'amélioration importante apportée par la méthode *PAVA*.

Le tableau 27 somme les résultats des deux taux pour la méthode *PAVA*.

Table 27: Somme des taux de faux positifs (*FP*) et du taux de faux négatifs (*FN*) en pourcentage, obtenus par la méthode *PAVA* ainsi que les valeurs de  $\log_{10}(\text{LR})$  minimales et maximales couvrant ces cas

	FN_PAVA + FP_PAVA	min( $\log_{10}(\text{LR} \text{Hp})$ )	max( $\log_{10}(\text{LR} \text{Hd})$ )
1VS345	89.78	-1.23	3.30
1VS234	56.53	-1.23	3.30
1VS2345	64.04	-1.48	3.14
2VS345	16.83	-1.39	3.38
5VS123	12.67	-0.26	3.00
4VS123	11.23	-0.88	3.25
5VS234	3.70	0.06	2.90
5VS1234	3.38	0.36	2.60

Il ressort qu'à l'exception des configurations impliquant le projectile numéro 1 comme test, à savoir les configurations *1VS234*, *1VS345* et *1VS2345*, les taux d'exclusion des résultats sont entre 3% et 17%. Donc, dans au moins 83% des cas, les LR seraient rapportés dans un rapport si ce régime était adopté.

Pour la suite des résultats, nous allons illustrer graphiquement l'impact des méthodes de calibration par les courbes *ECE* et l'effet de celles-ci sur les *LR* obtenus par une représentation des *LR* sous la forme de densité et une représentation par des *Tippett plot*. Afin de ne pas encombrer ce chapitre avec une information parfois redondante, nous présenterons seulement, pour deux configurations, un cas où le projectile en question a été récupéré après l'alimentation de la base de données par l'arme saisie (*1VS234* et *1VS2345*), et un cas où le projectile en question a été récupéré avant l'alimentation de la base de données par l'arme suspecte (*5VS234* et *5VS1234*). Ces cas sont représentatifs des comportements observés pour les autres cas de figure, ceux-ci sont documentés de manière analogue dans l'annexe 4.

Plus spécifiquement, les résultats suivants sont présentés avant et après calibration par la régression logistique et la méthode *PAVA* :

- Les figures (74, 75, 76 et 77) présentent les courbes *ECE* obtenues avant et après la calibration des rapports de vraisemblance.

- Les figures (78, 80, 82 et 84) présentent les courbes de fonctions de densité des  $LR$ , obtenus entre les projectiles tirés par les mêmes armes ( $H_p$ ) et entre les projectiles tirés par des armes différentes ( $H_d$ ), avant et après la calibration.
- Les figures (79, 81, 83 et 85) présentent les courbes de fonctions de densité des  $LRs$  avant la calibration, obtenus entre les projectiles tirés par les mêmes armes ( $H_p$ ) et ses maximums obtenus entre les projectiles tirés par des armes différentes ( $max\_H_d$ ).
- Les figures (86, 87, 88 et 89) donnent les courbes *Tippett* du  $LR$ , sous les deux hypothèses  $H_d$  et  $H_p$ , avant et après calibration.
- Les figures (90, 91, 92 et 93) donnent les courbes *DET*, obtenues avant et après calibration.

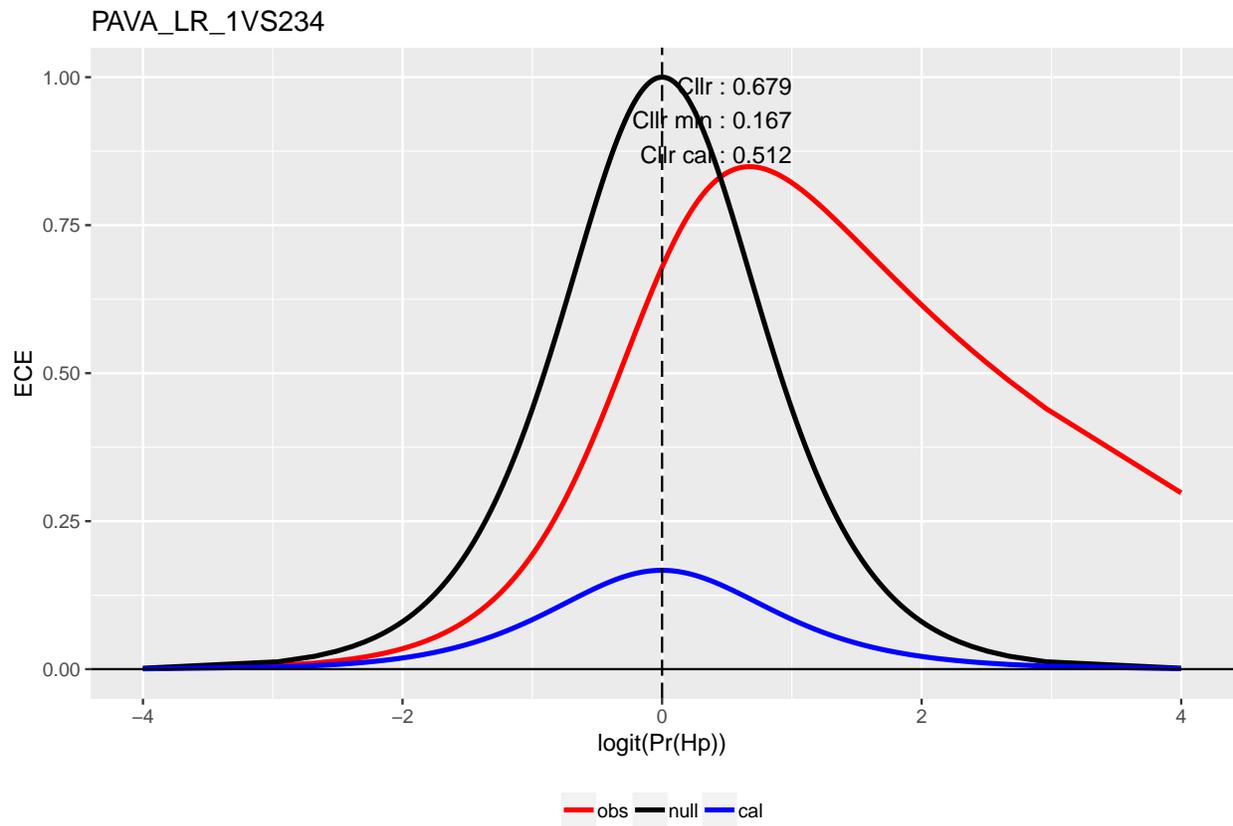
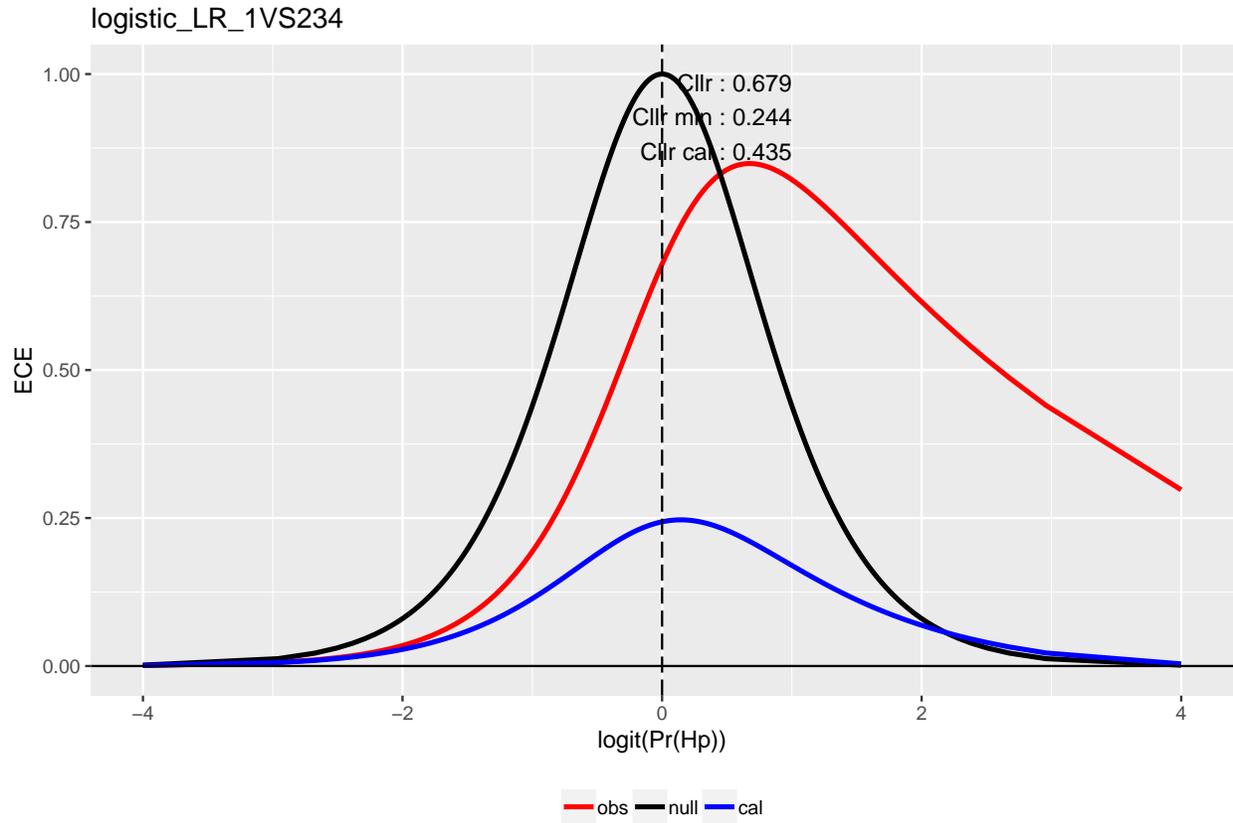


Figure 74: En haut: Courbe de calibration  $ECE$  obtenue par régression logistique. En bas: Courbe de calibration  $ECE$  obtenue par la méthode PAVA. 147

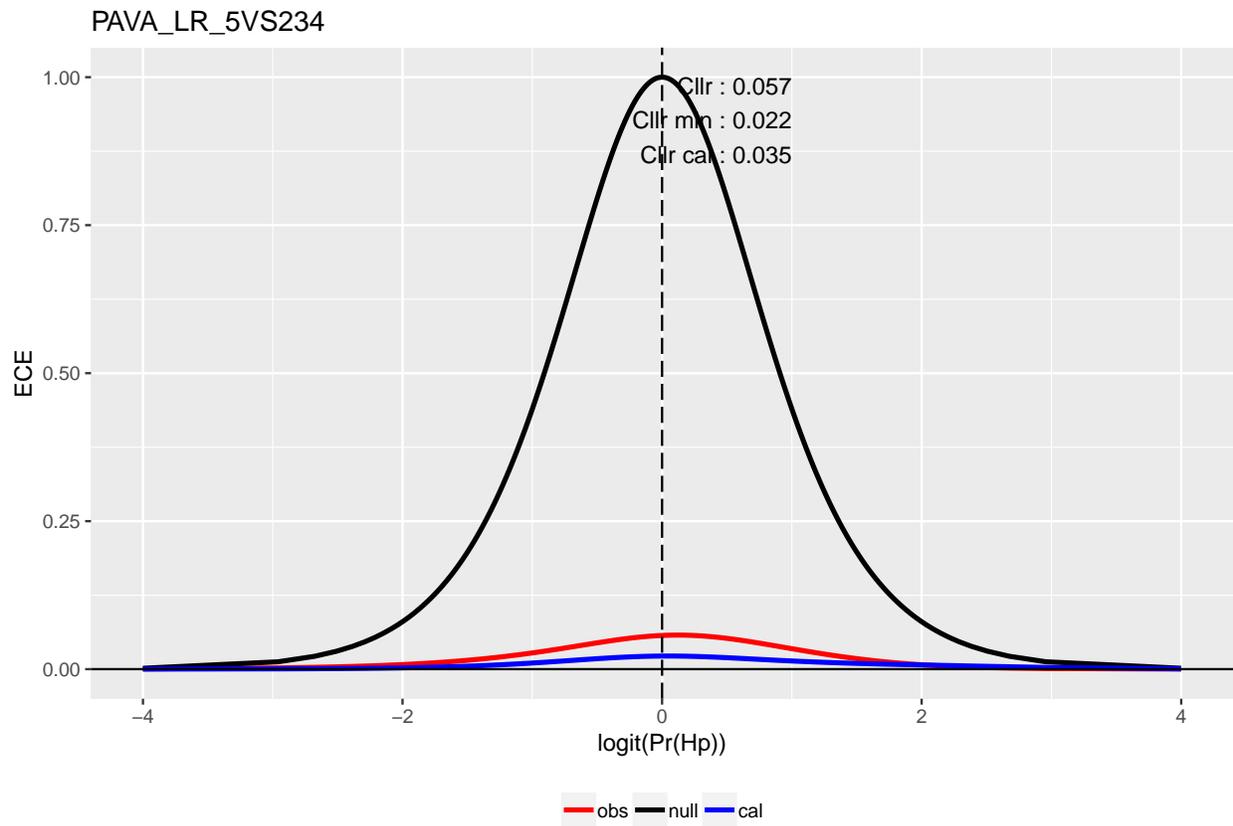
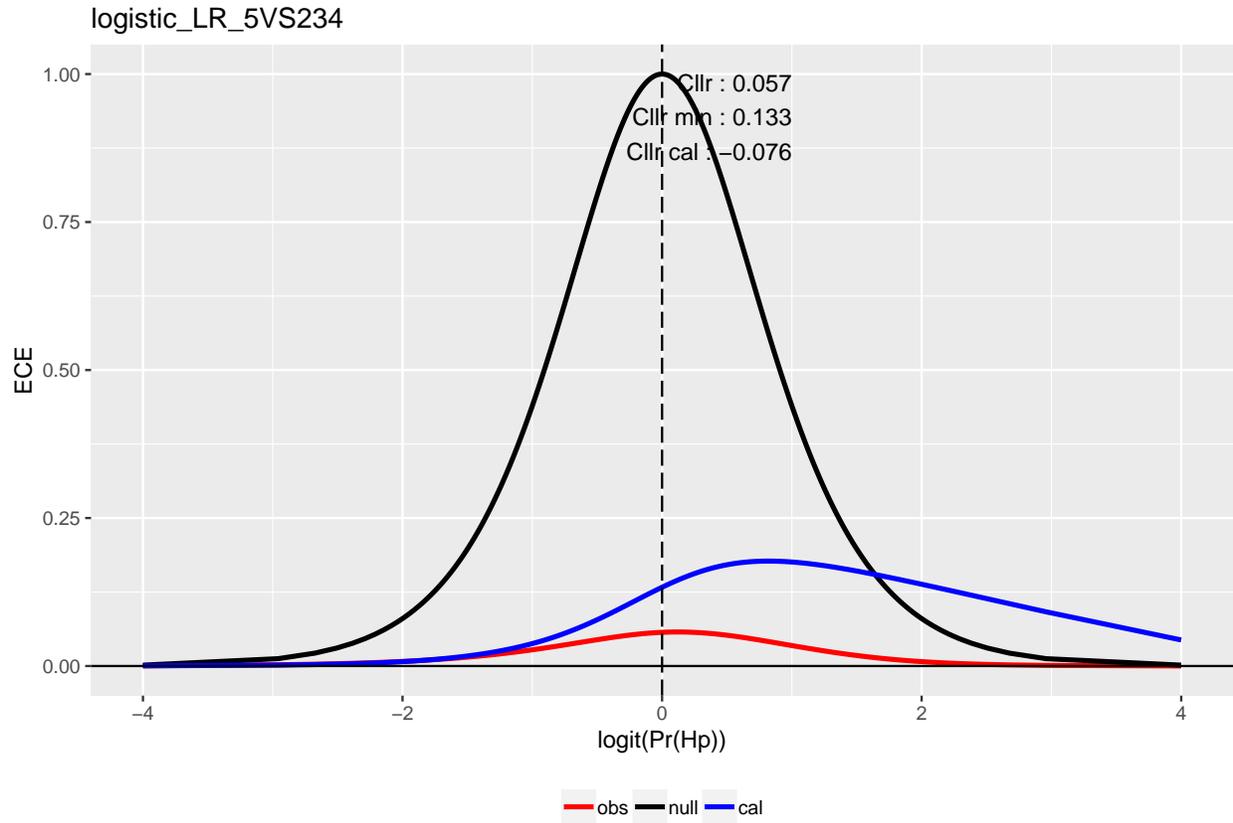


Figure 75: En haut: Courbe de calibration  $ECE$  obtenue par régression logistique. En bas: Courbe de calibration  $ECE$  obtenue par la méthode  $PAVA$ . 148

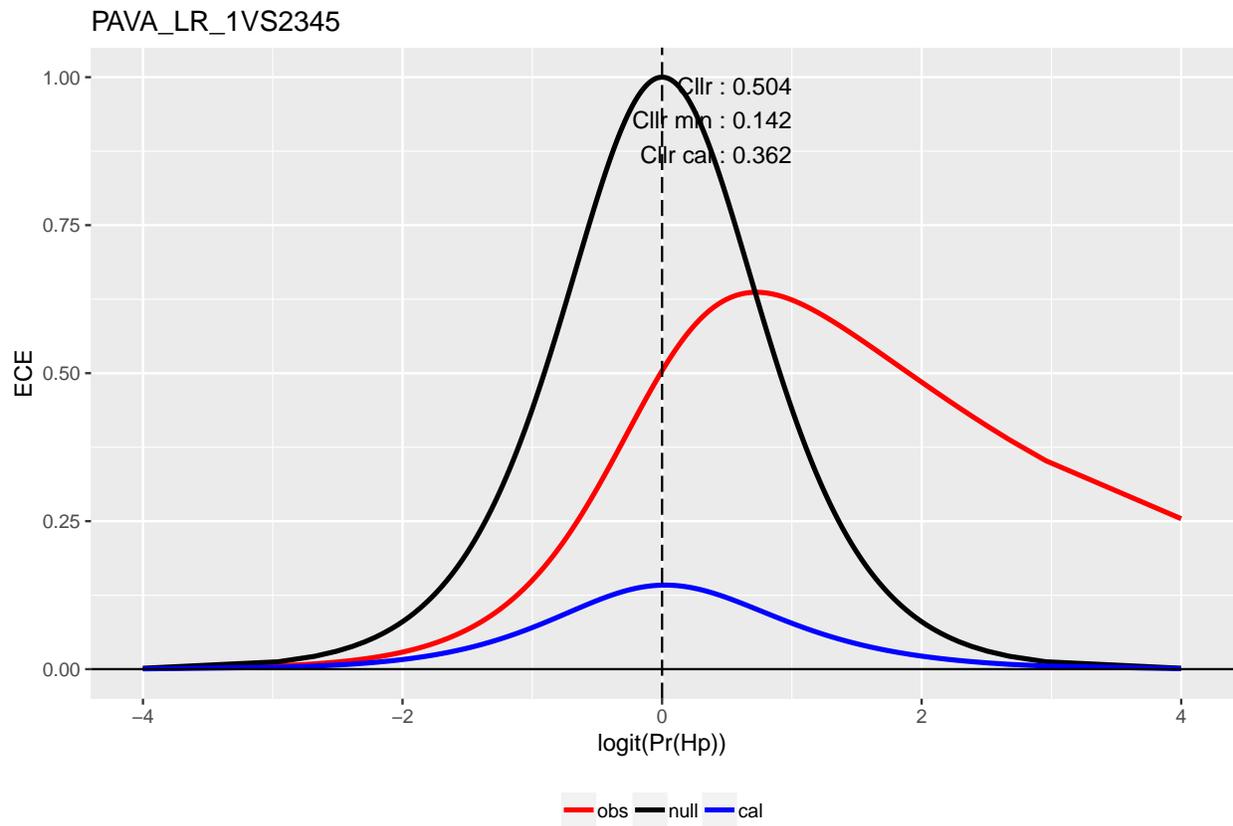
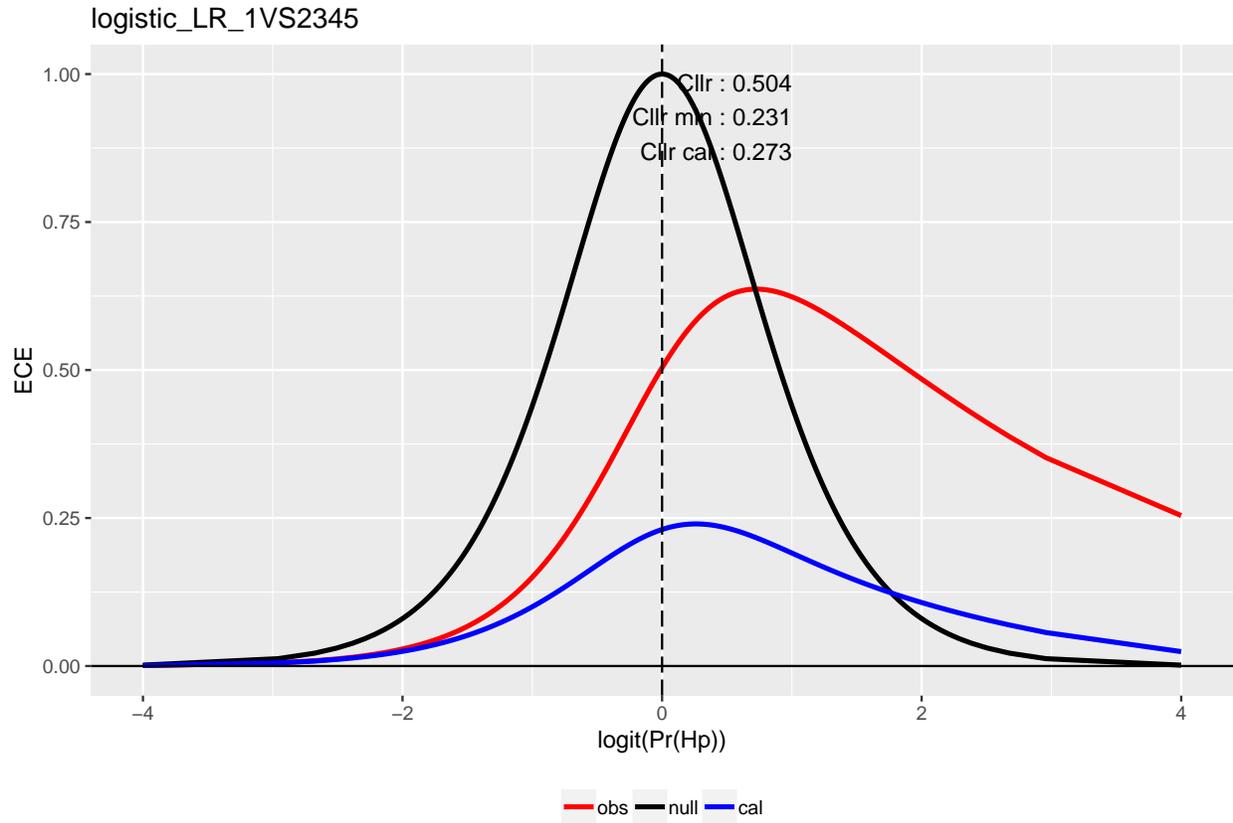


Figure 76: En haut: Courbe de calibration  $ECE$  obtenue par régression logistique. En bas: Courbe de calibration  $ECE$  obtenue par la méthode *PAVA*. 149

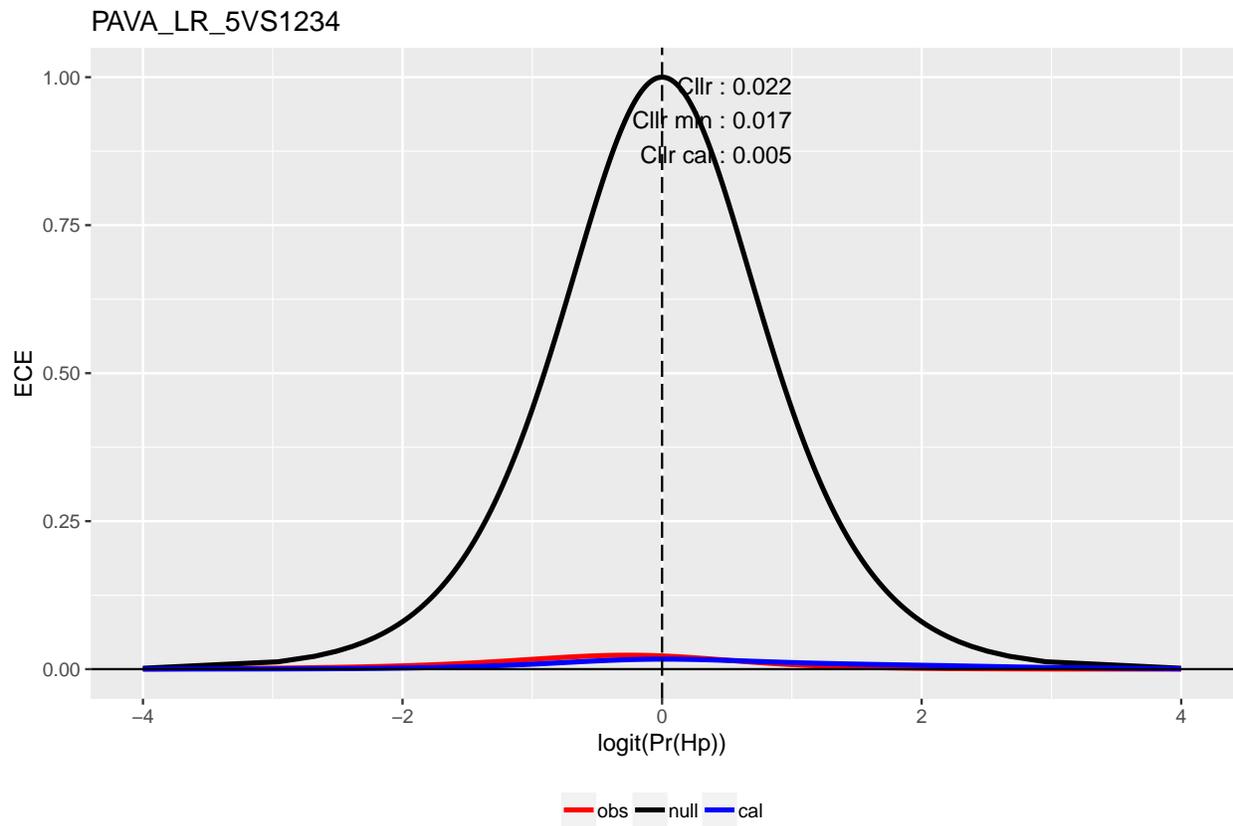
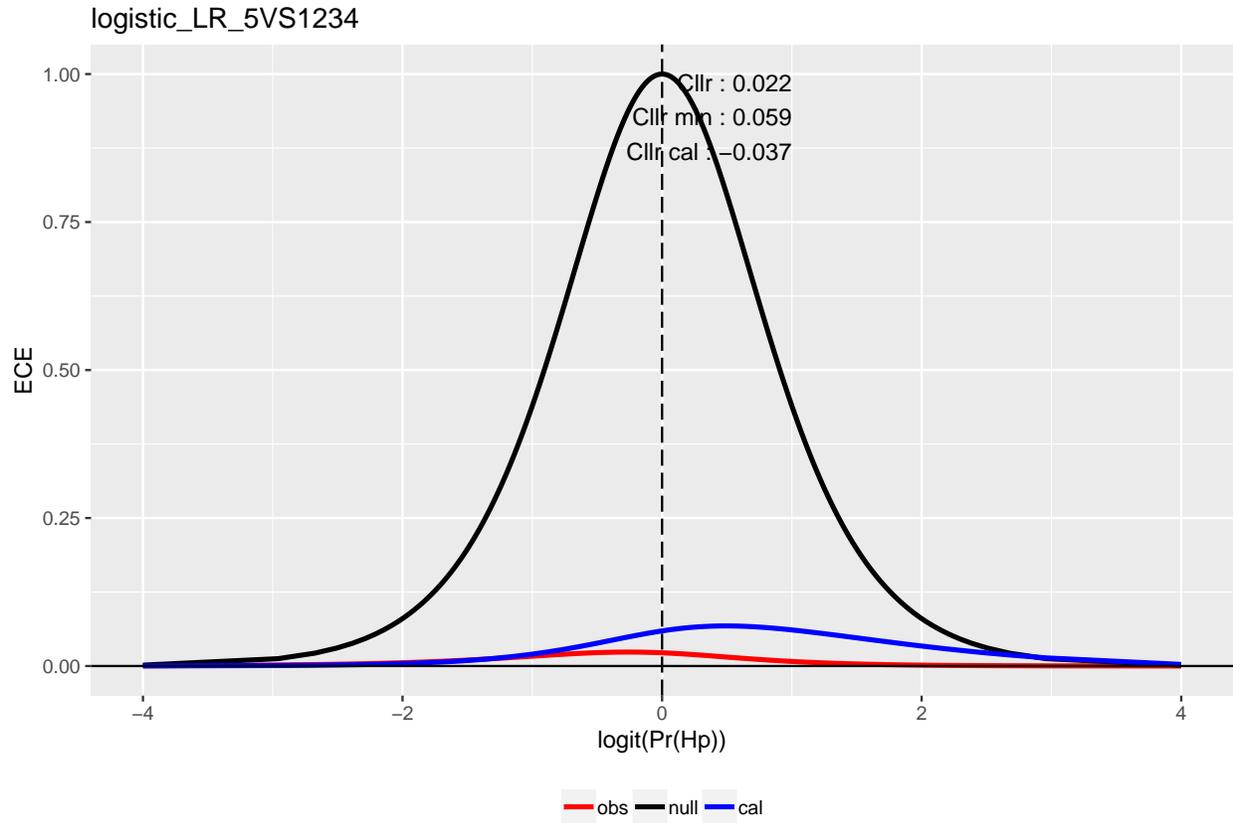


Figure 77: En haut: Courbe de calibration  $ECE$  obtenue par régression logistique. En bas: Courbe de calibration  $ECE$  obtenue par la méthode  $PAVA$ . 150

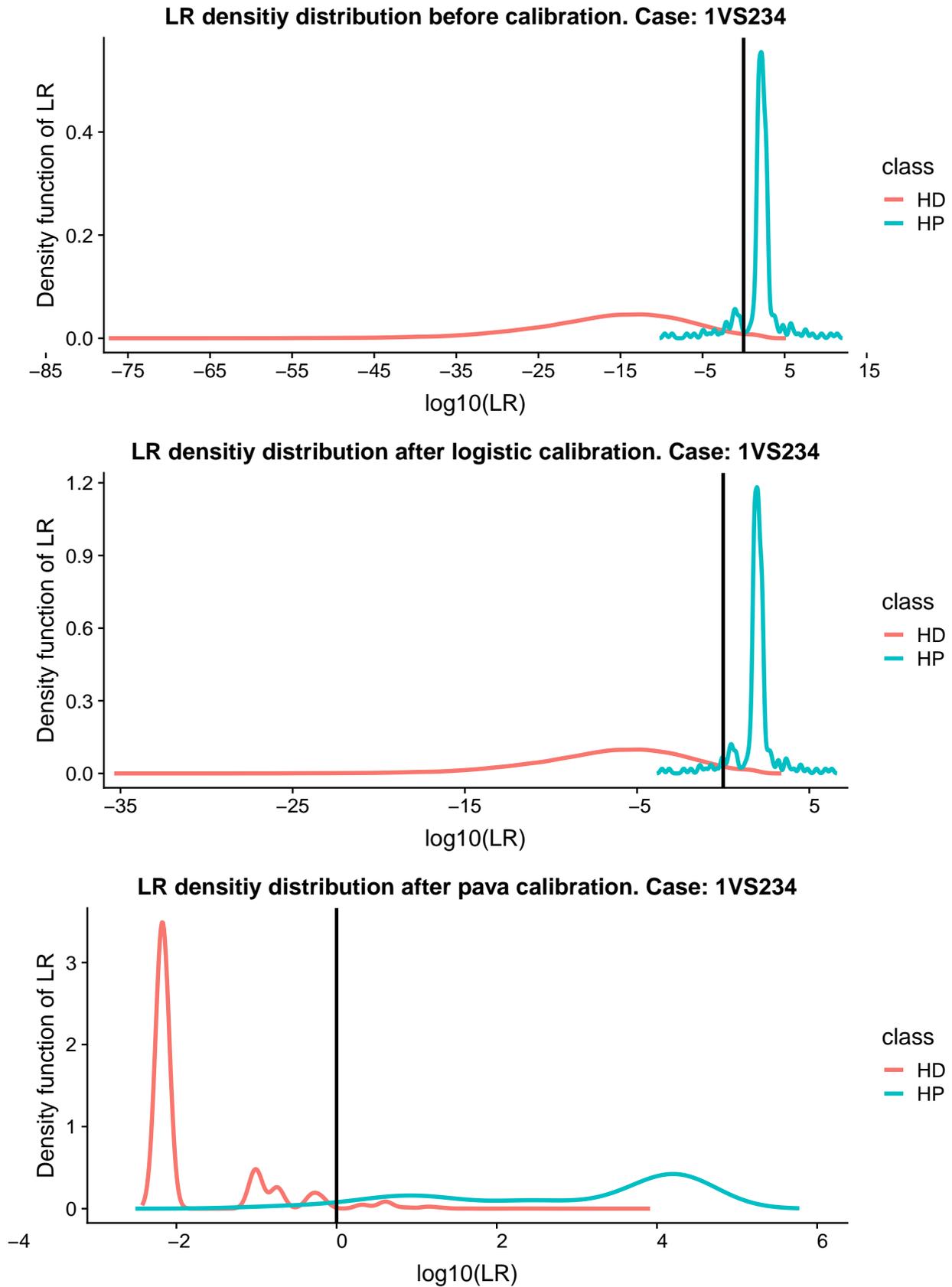


Figure 78: Distribution des densités du  $LR$ , avant et après la calibration, pour le cas  $1VS234$

### LR density distribution . Case: 1VS234

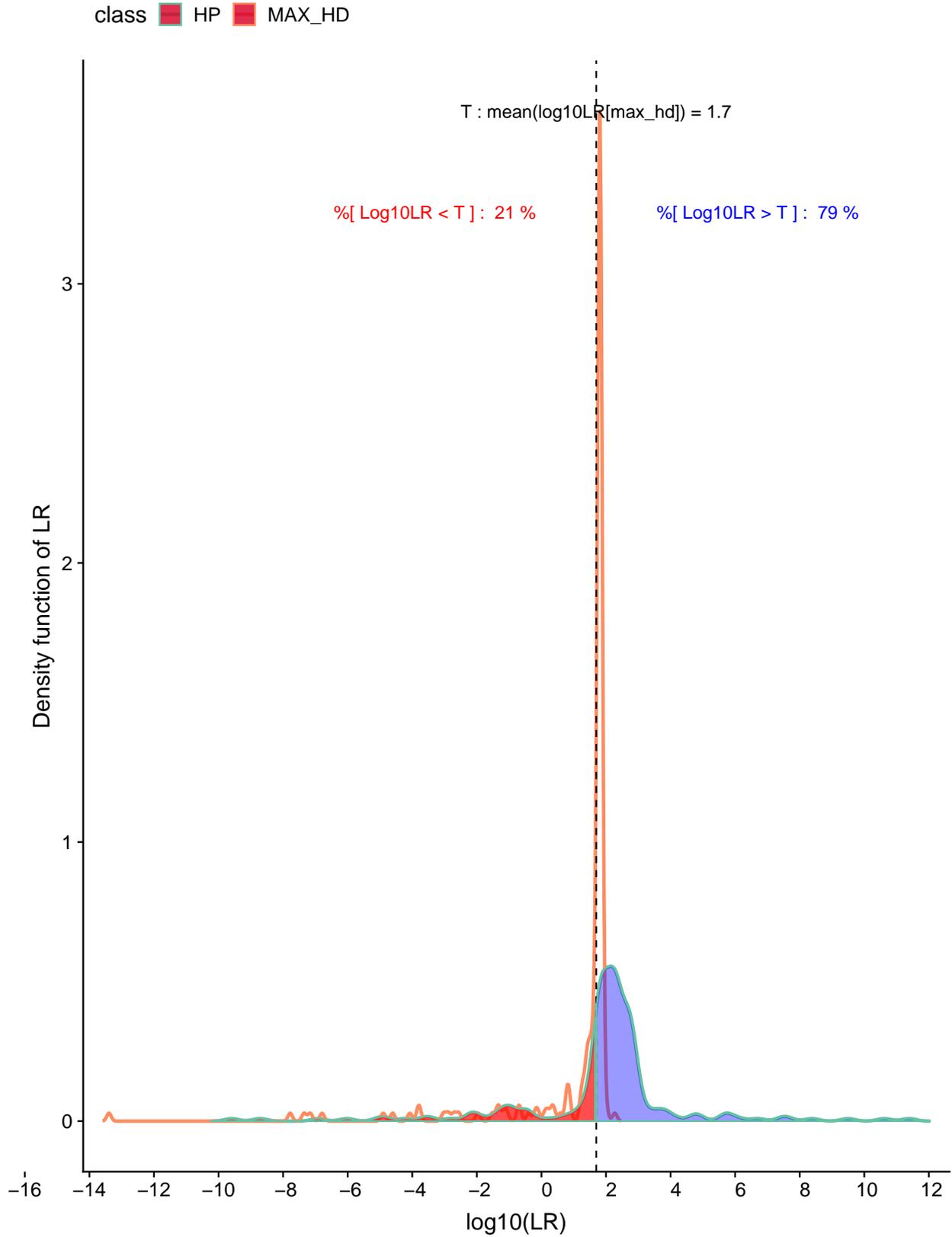


Figure 79: Distribution des densités du  $LR$ , sous  $H_p$  et son maximum sous  $H_d$ , pour le cas 1VS234

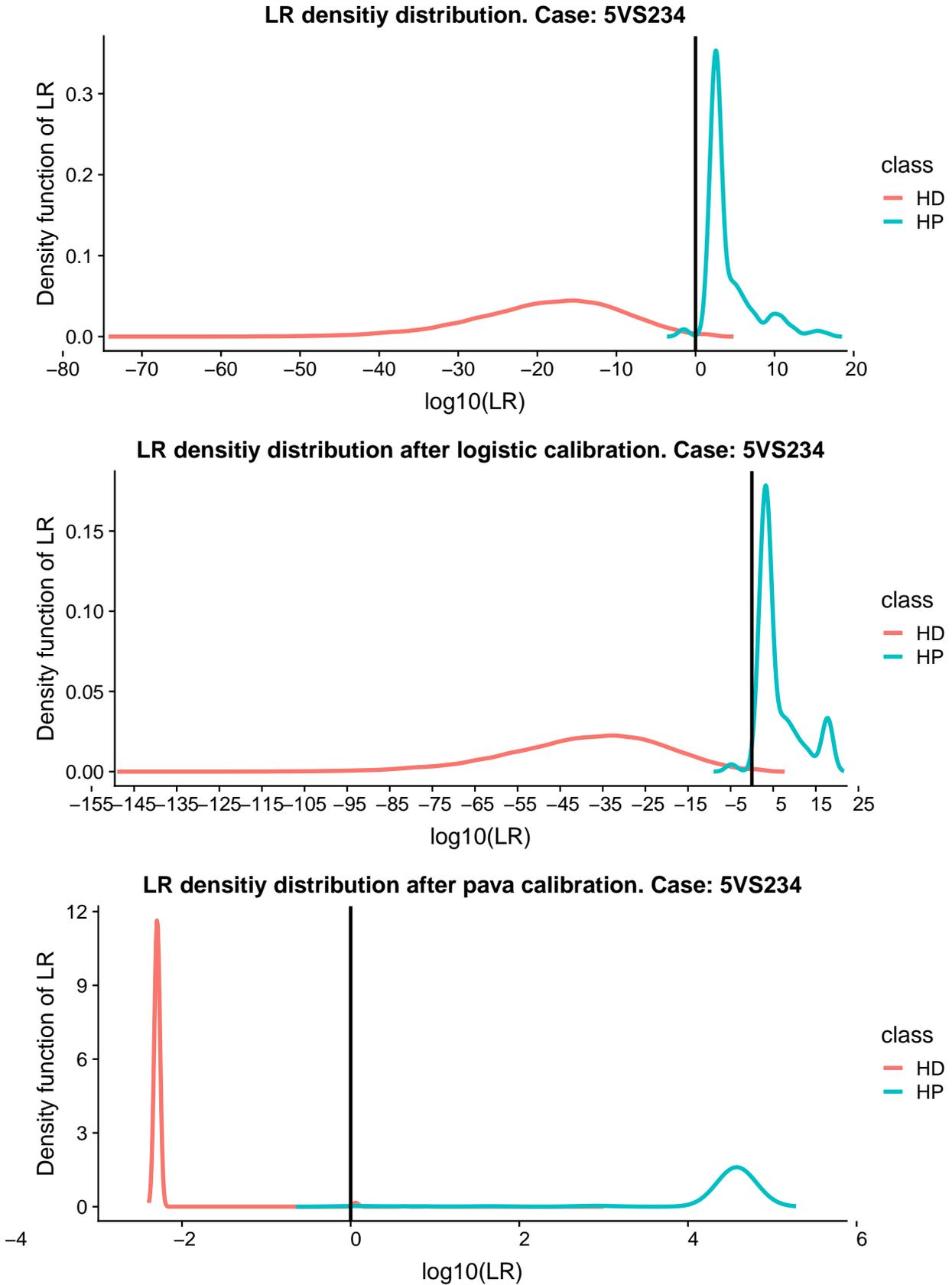


Figure 80: Distribution des densités du  $LR$ , avant et après la calibration, pour le cas  $5VS234$

### LR density distribution . Case: 5VS234

class ■ HP ■ MAX\_HD

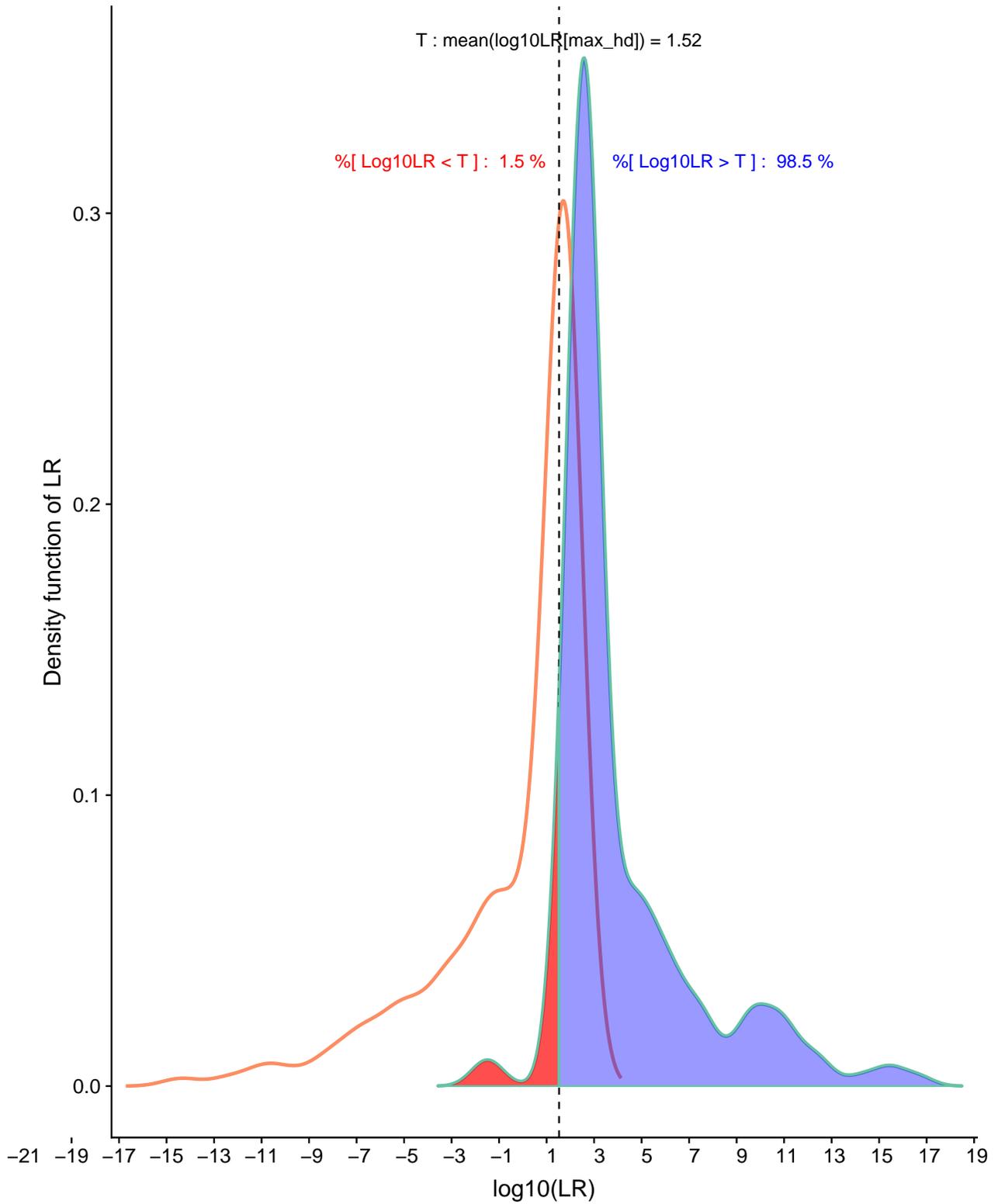


Figure 81: Distribution des densités du  $LR$ , sous  $H_p$  et son maximum sous  $H_d$ , pour le cas 5VS234

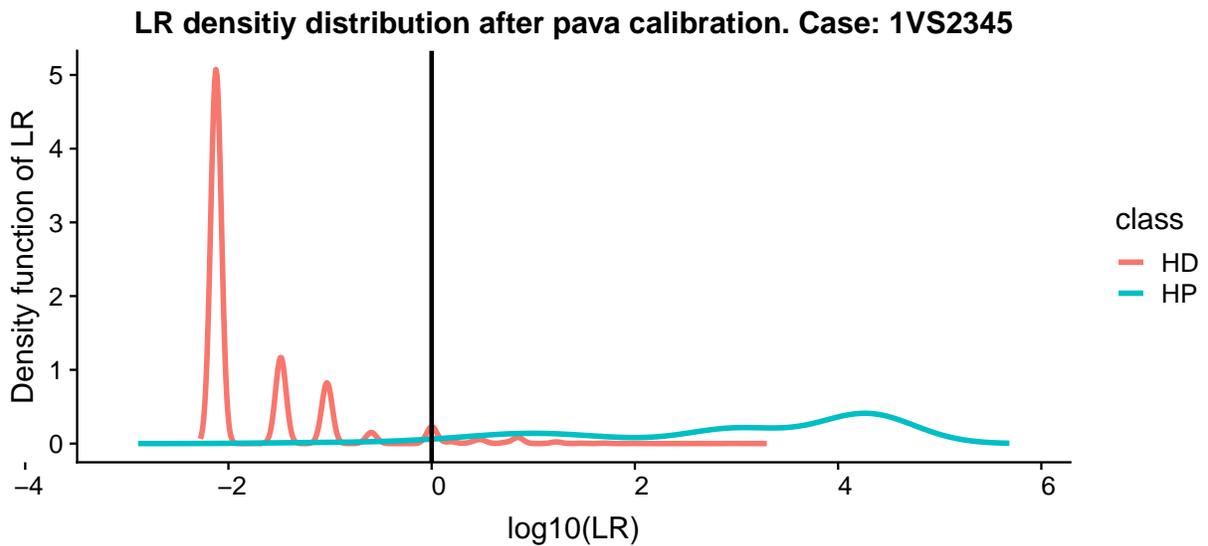
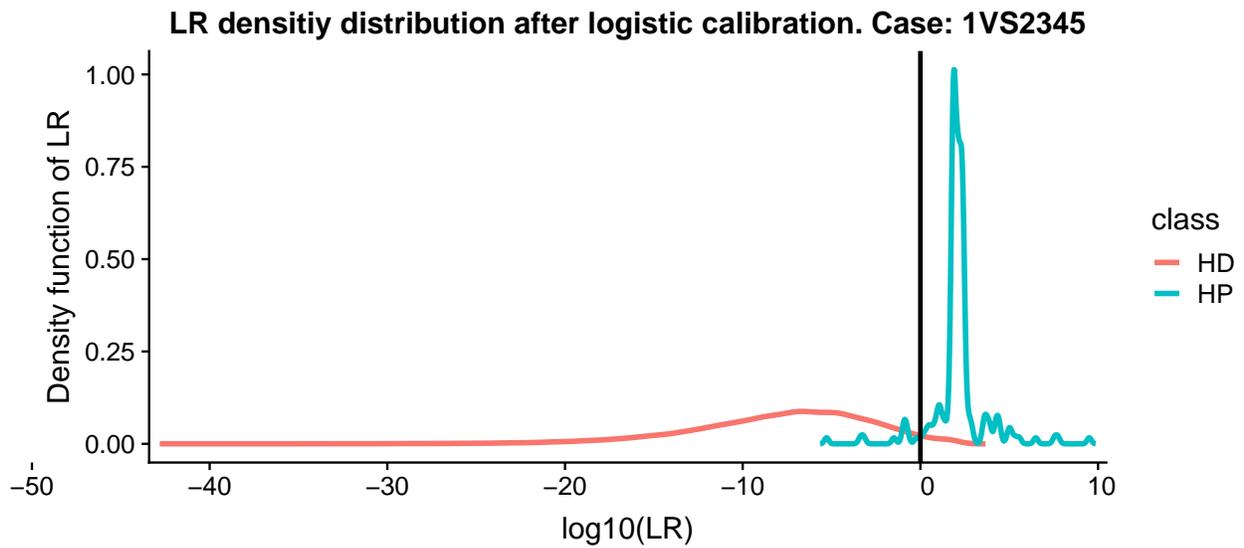
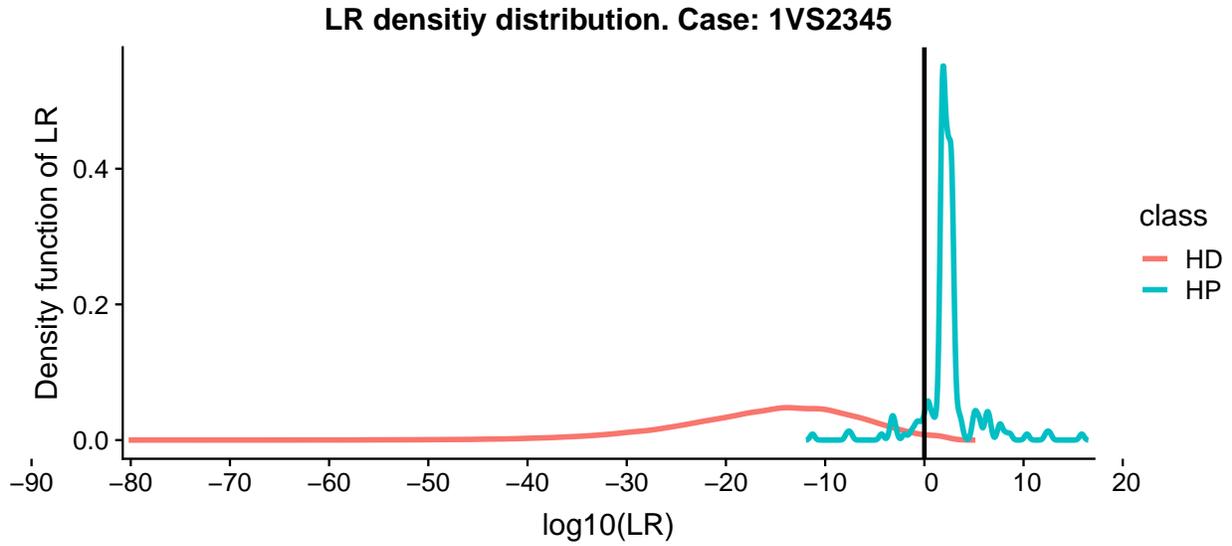


Figure 82: Distribution des densités du  $LR$ , avant et après la calibration, pour le cas  $1VS2345$

### LR density distribution . Case: 1VS2345

class ■ HP ■ MAX\_HD

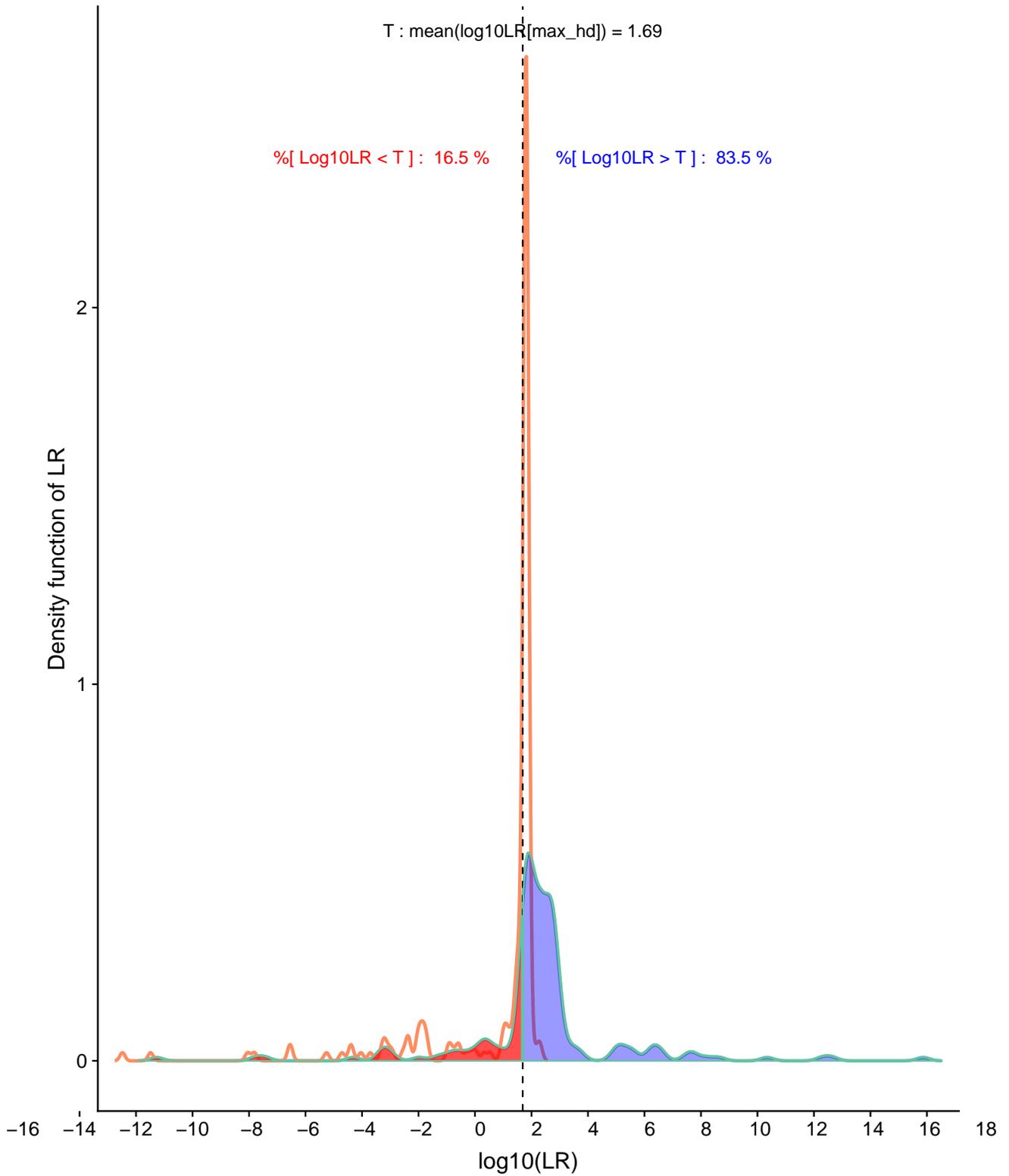


Figure 83: Distribution des densités du  $LR$ , sous  $H_p$  et son maximum sous  $H_d$ , pour le cas 1VS2345

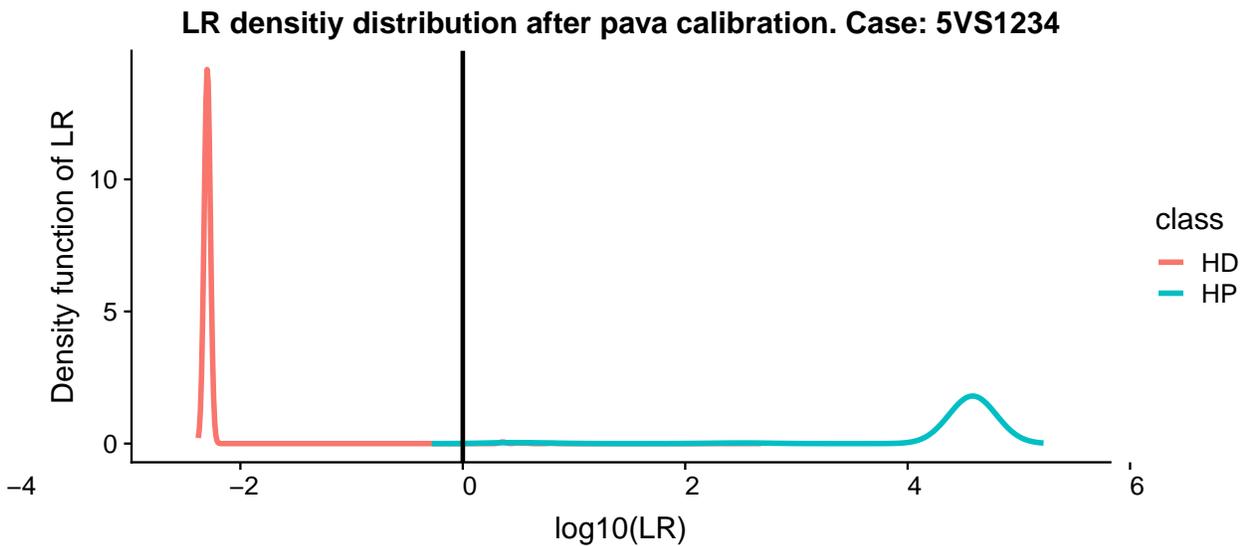
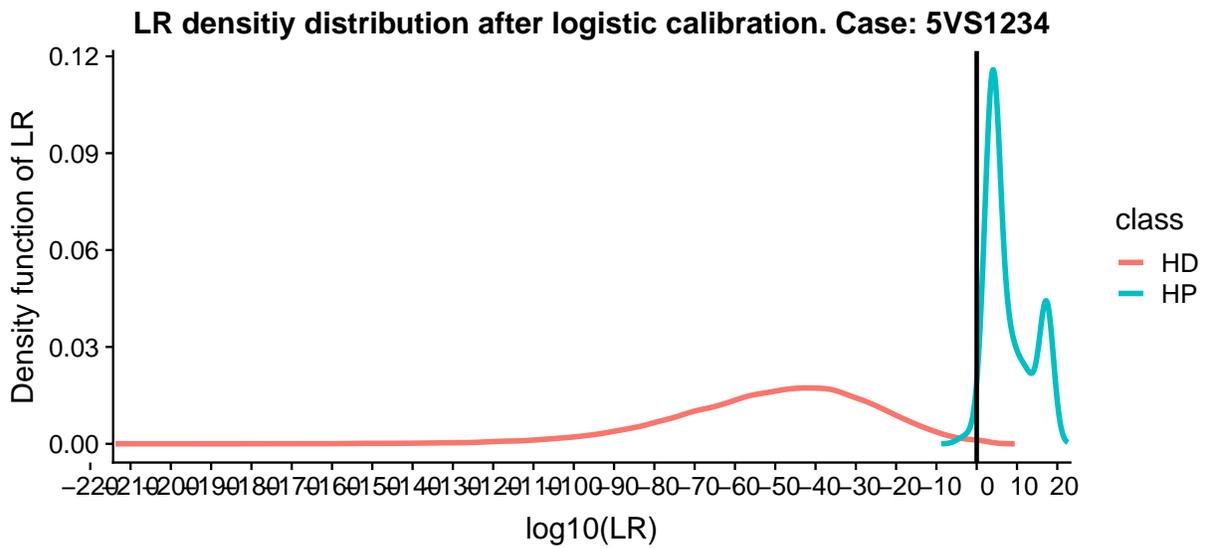
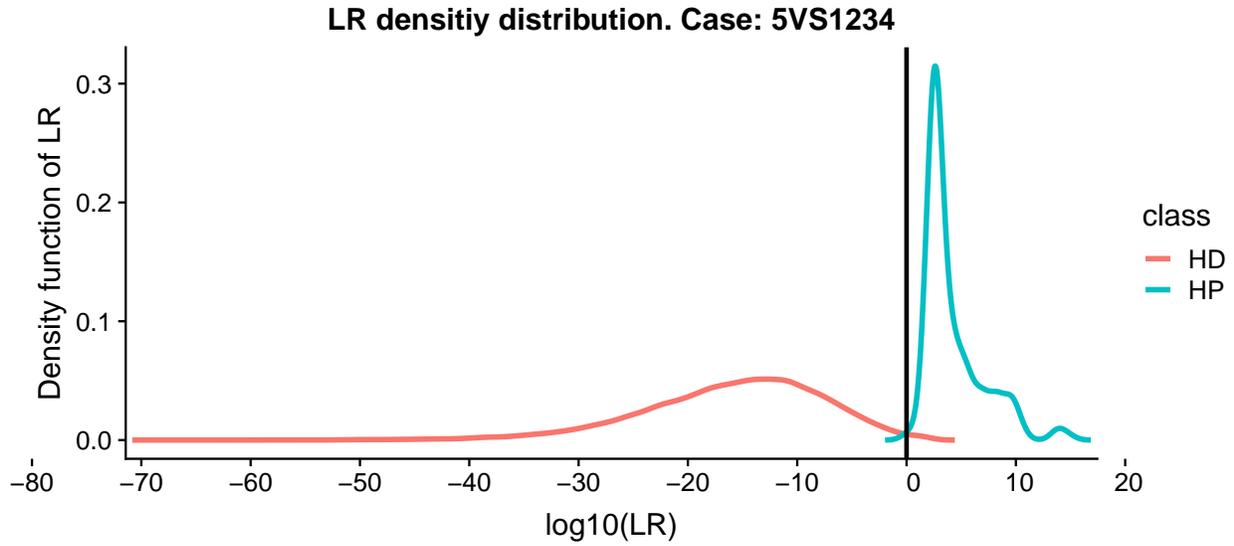


Figure 84: Distribution des densités du  $LR$ , avant et après la calibration, pour le cas  $5VS1234$

### LR density distribution . Case: 5VS1234

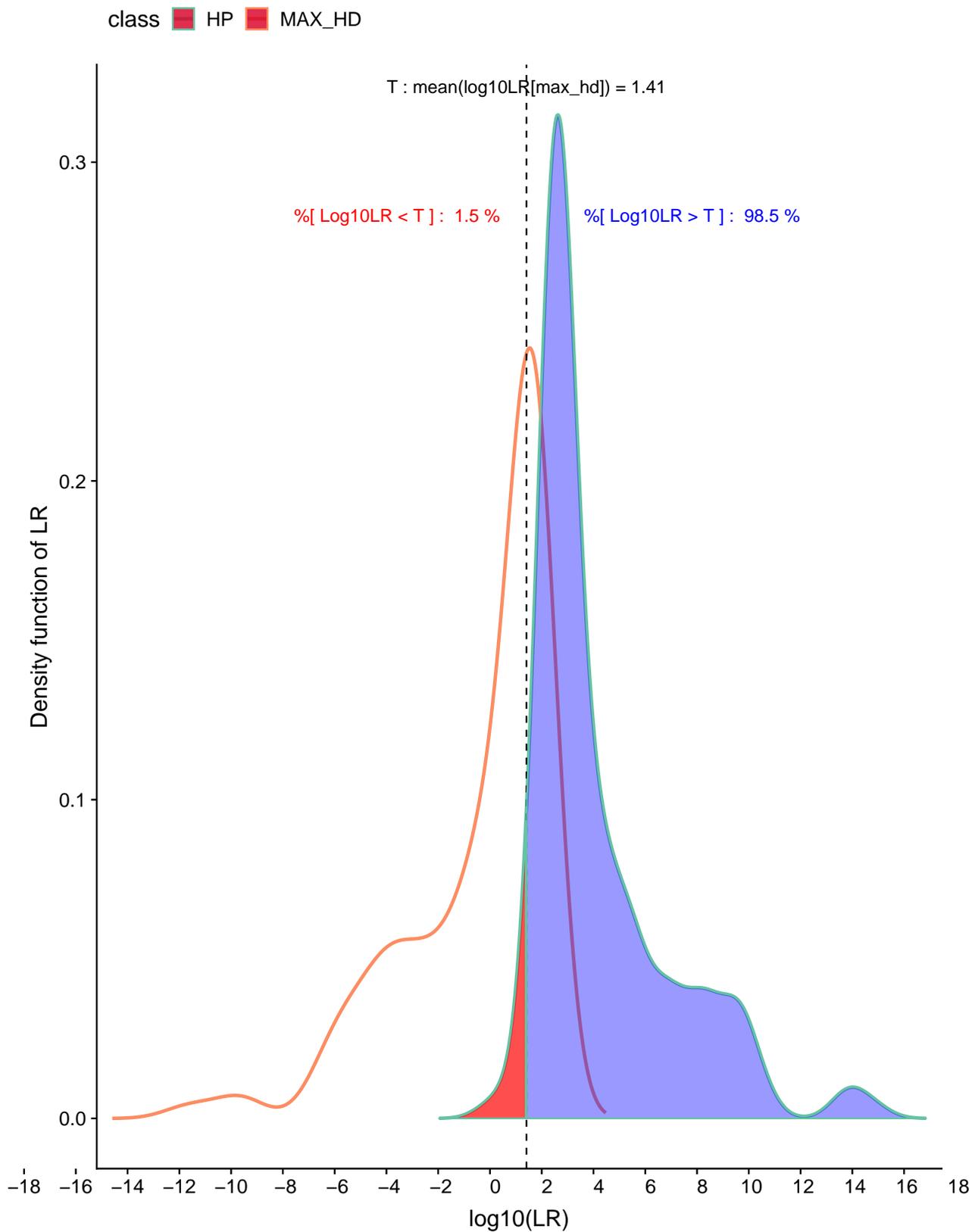


Figure 85: Distribution des densités du  $LR$ , sous  $H_p$  et son maximum sous  $H_d$ , pour le cas  $5VS1234$

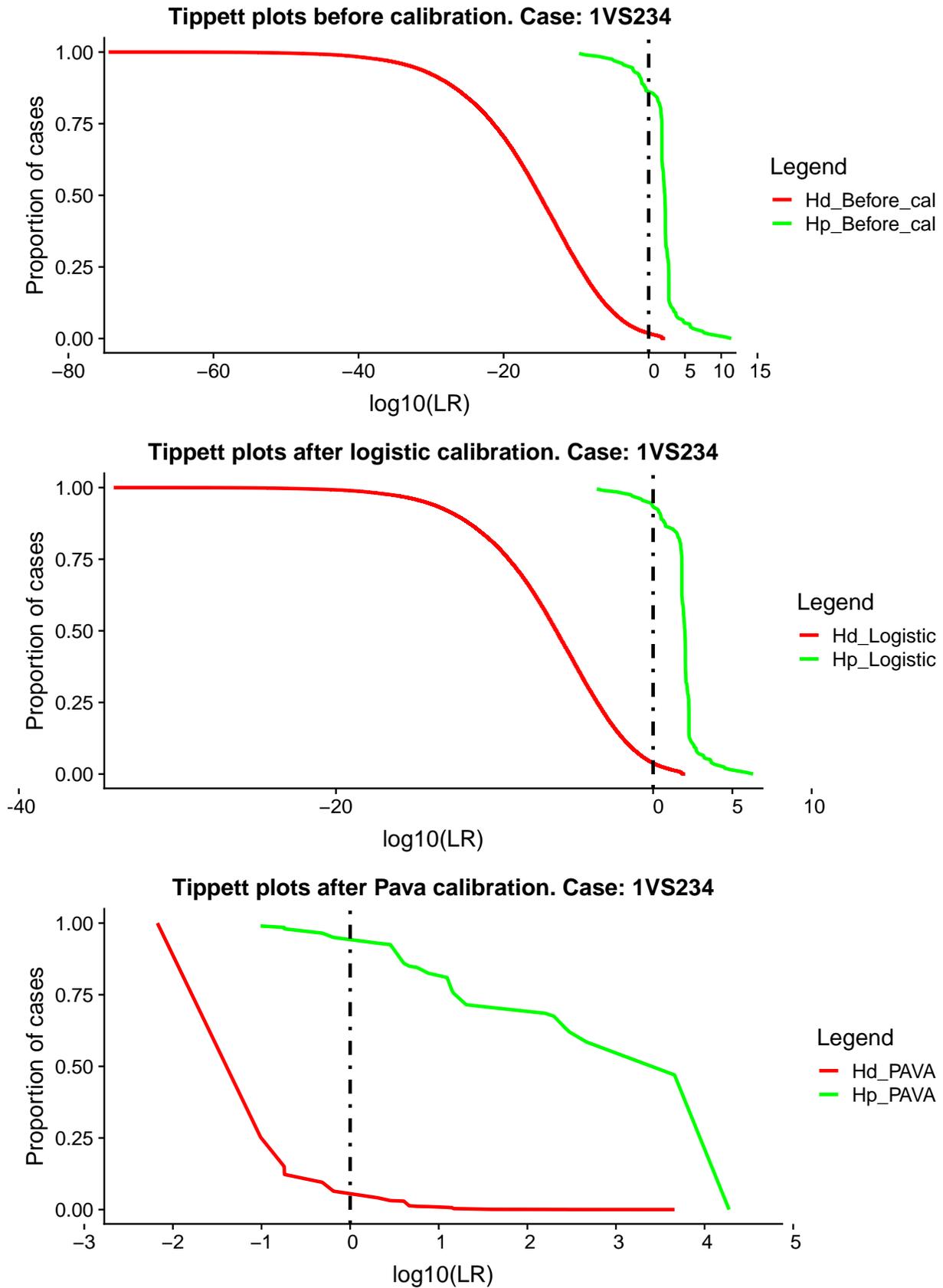


Figure 86: Courbes *Tippet* pour le cas 1VS234

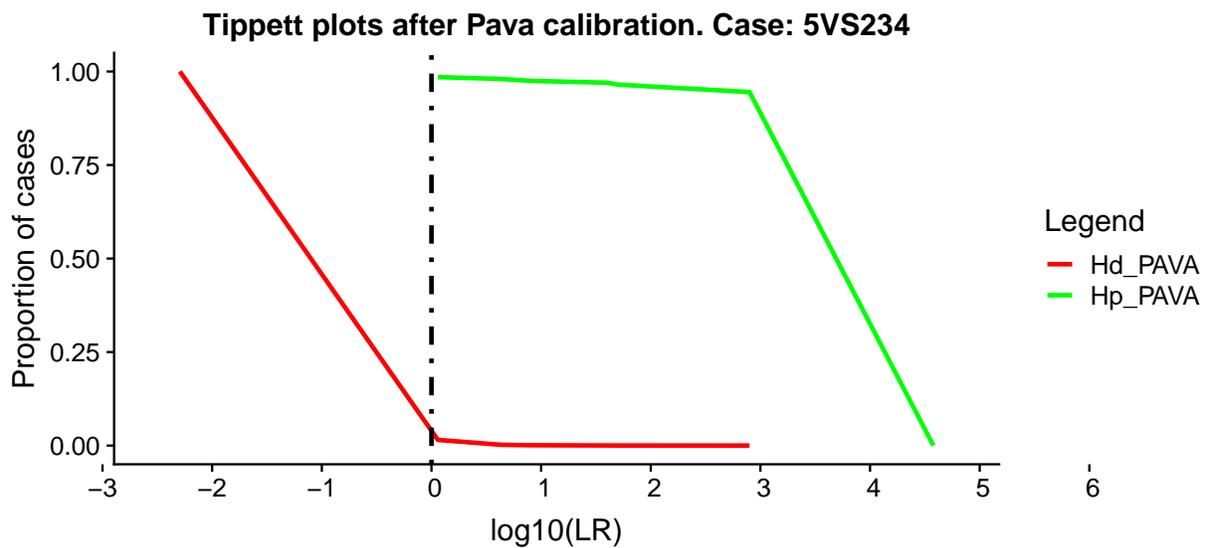
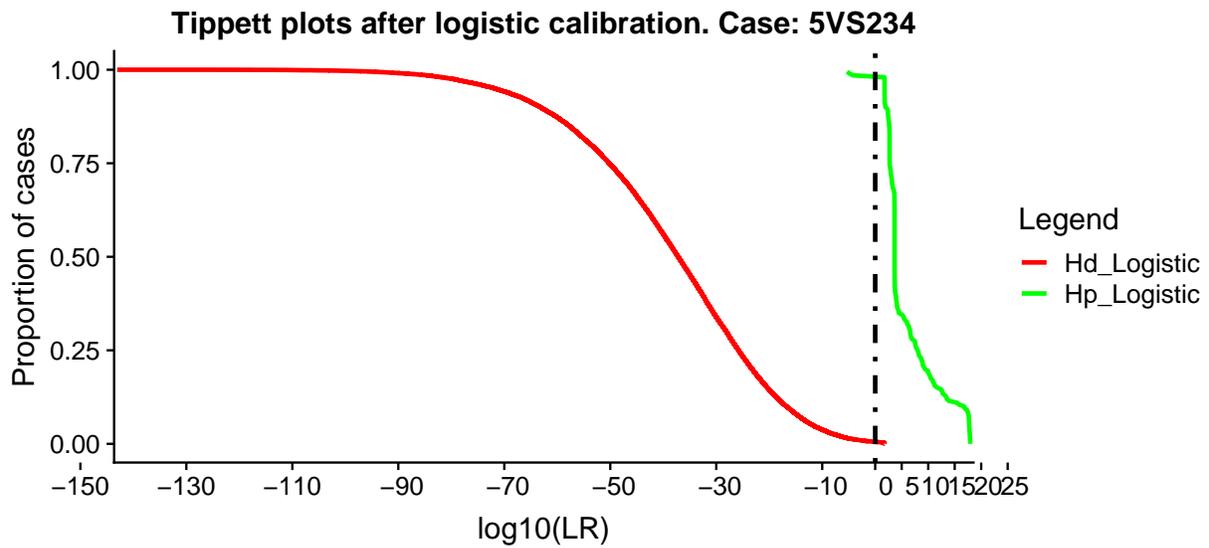
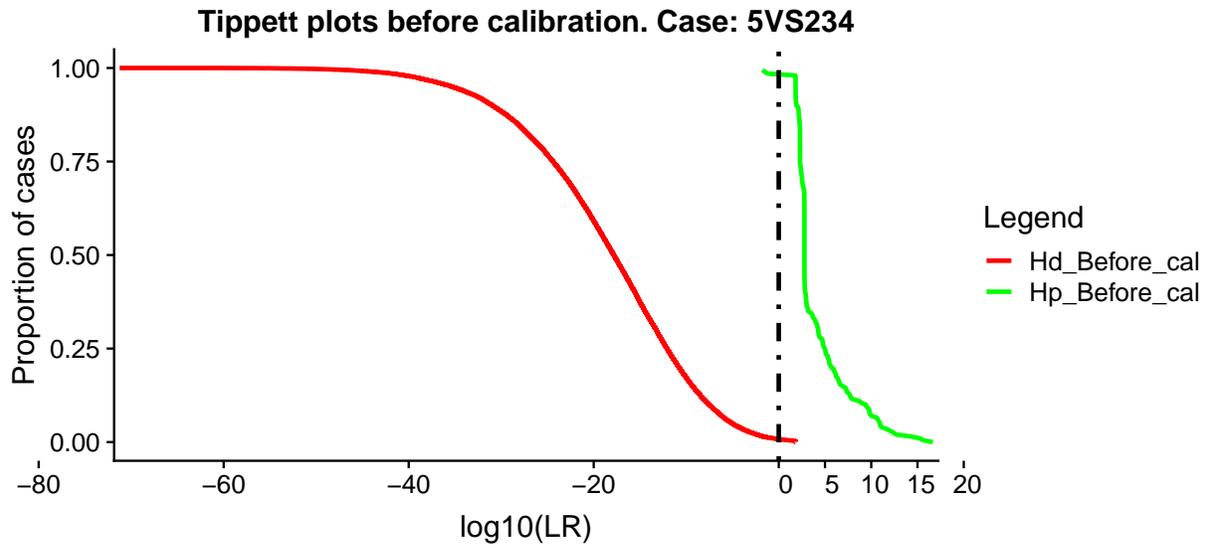


Figure 87: Courbes *Tippett* pour le cas 5VS234

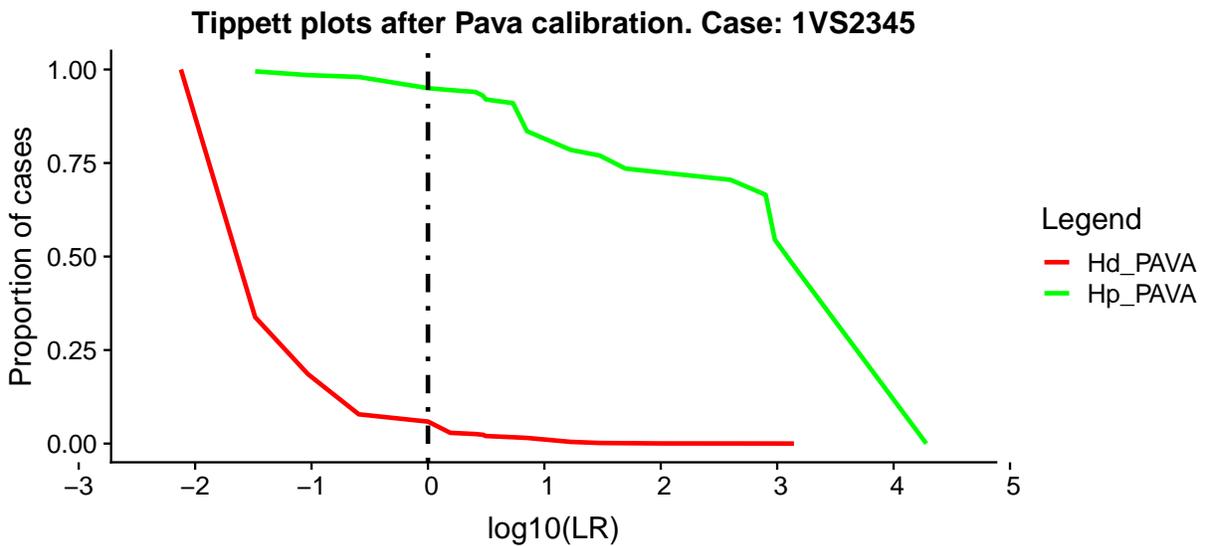
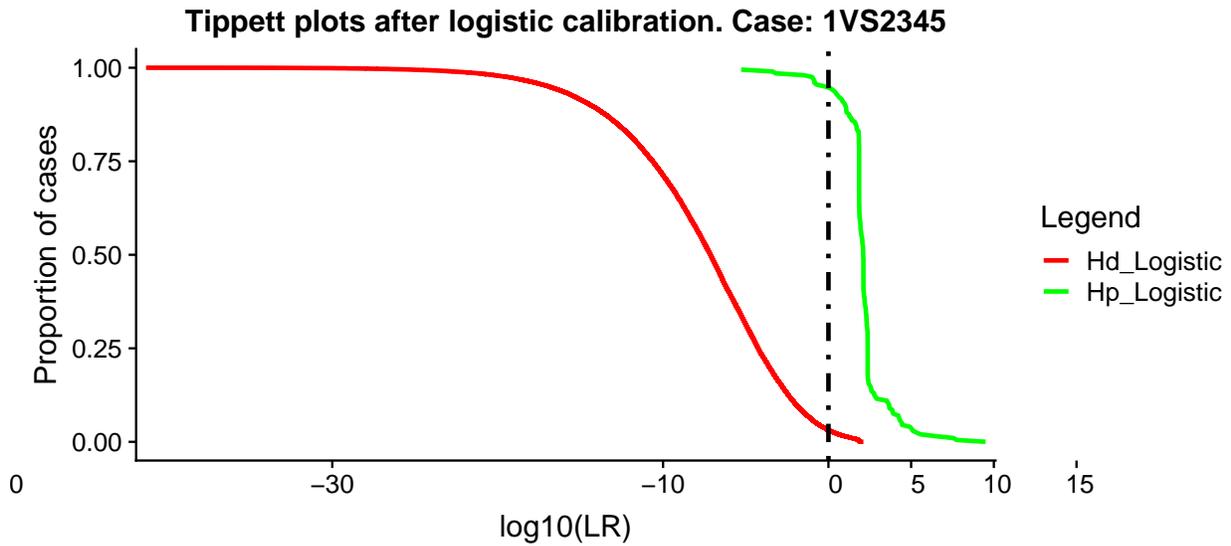
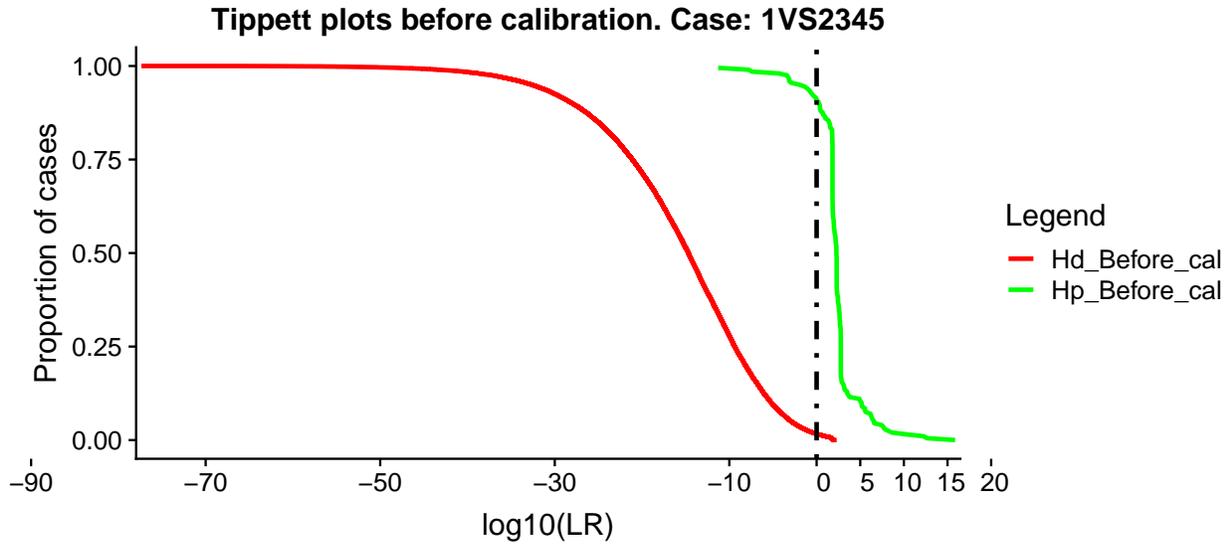


Figure 88: Courbes *Tippett* pour le cas 1VS2345

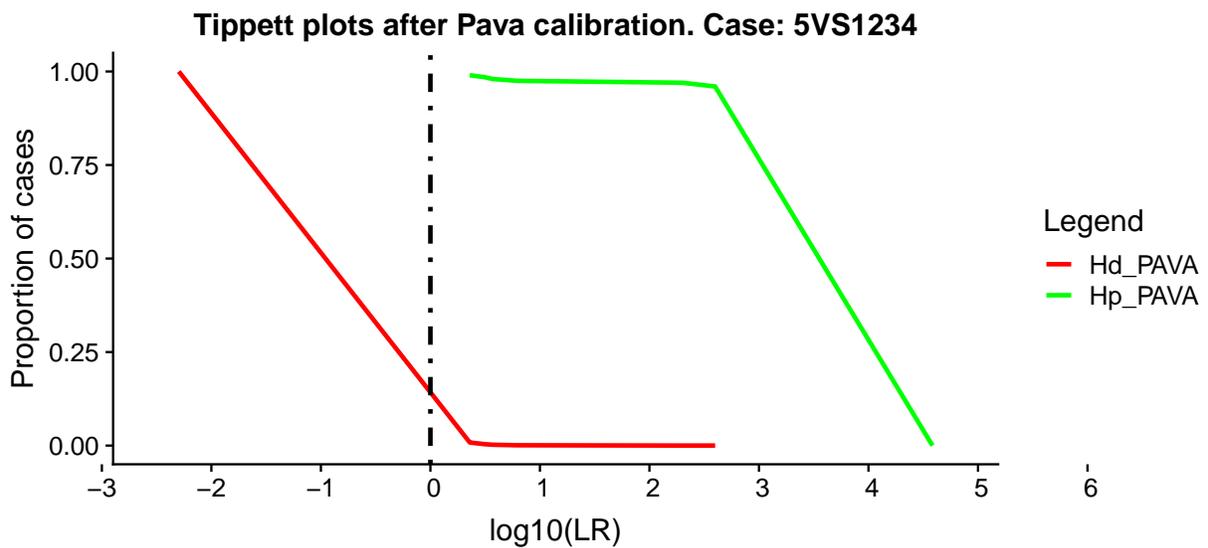
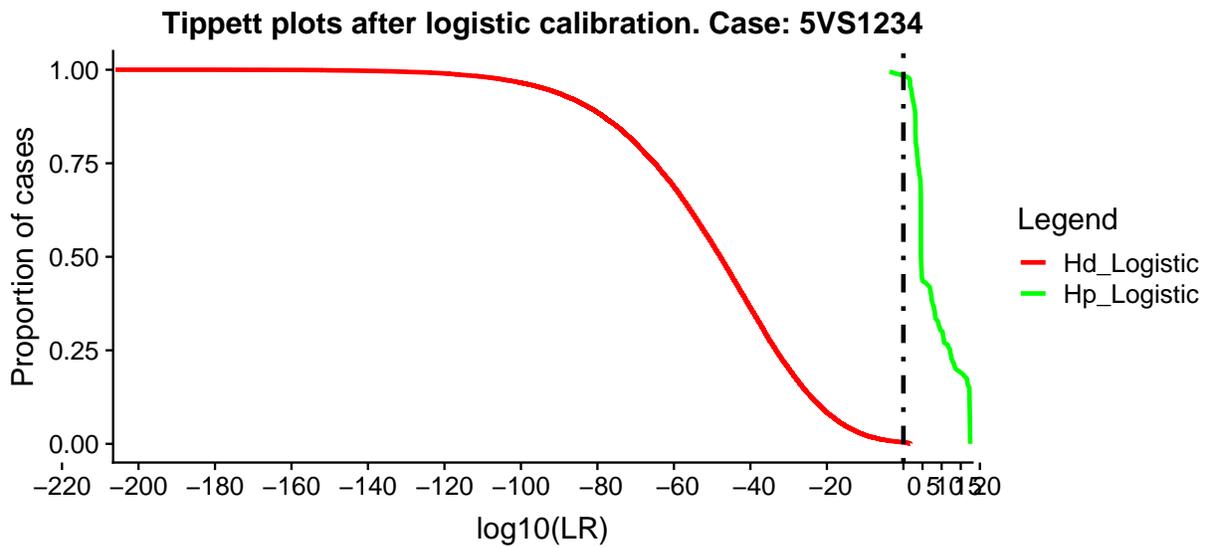
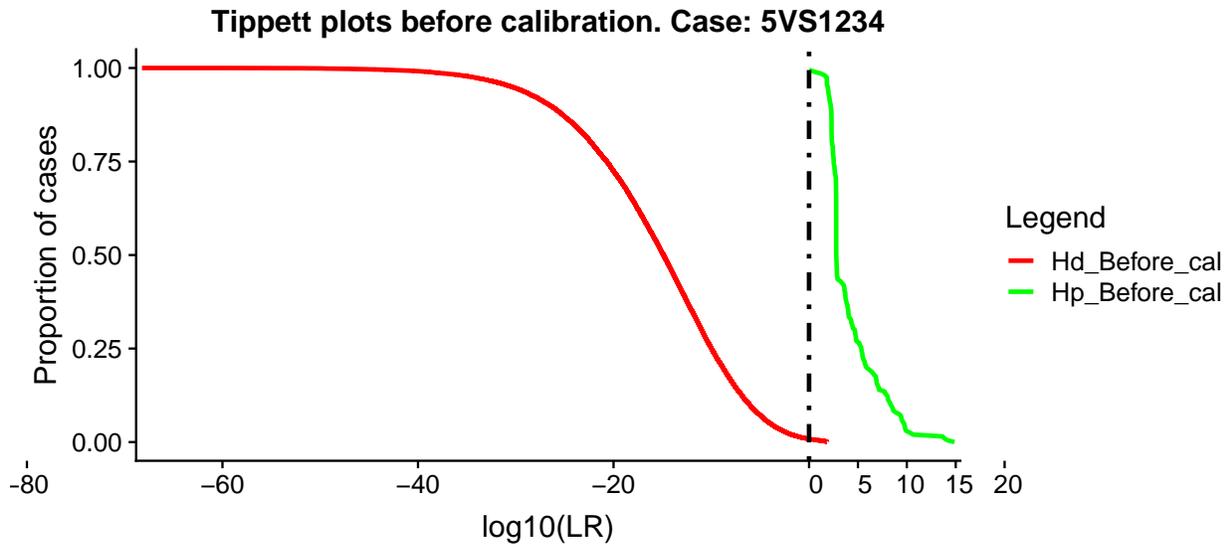


Figure 89: Courbes *Tippett* pour le cas 5VS1234

### DET Curves.

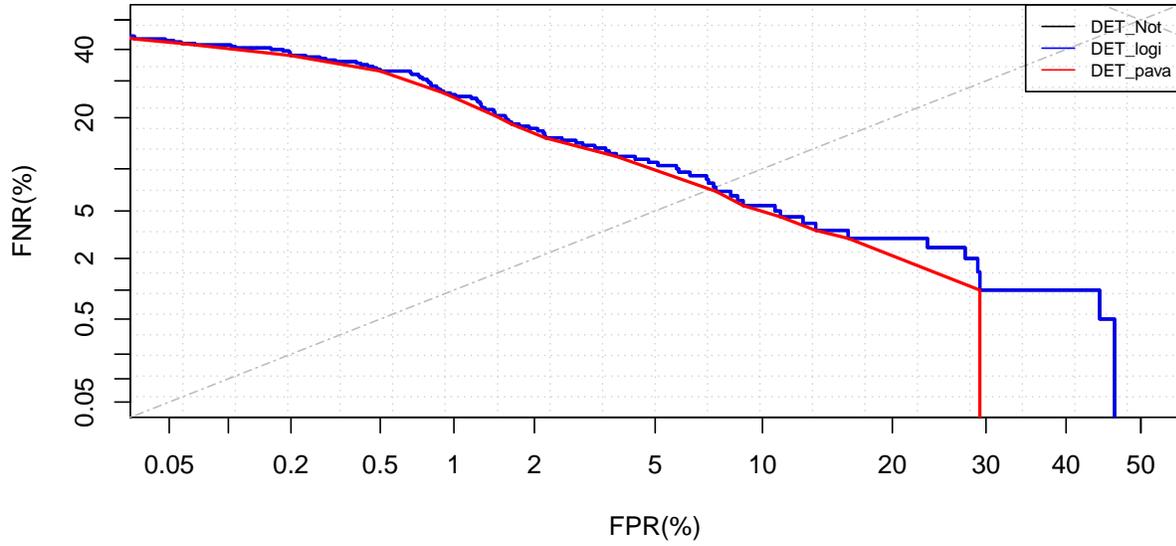


Figure 90: Courbes *DET* pour le cas 1VS234

### DET Curves.

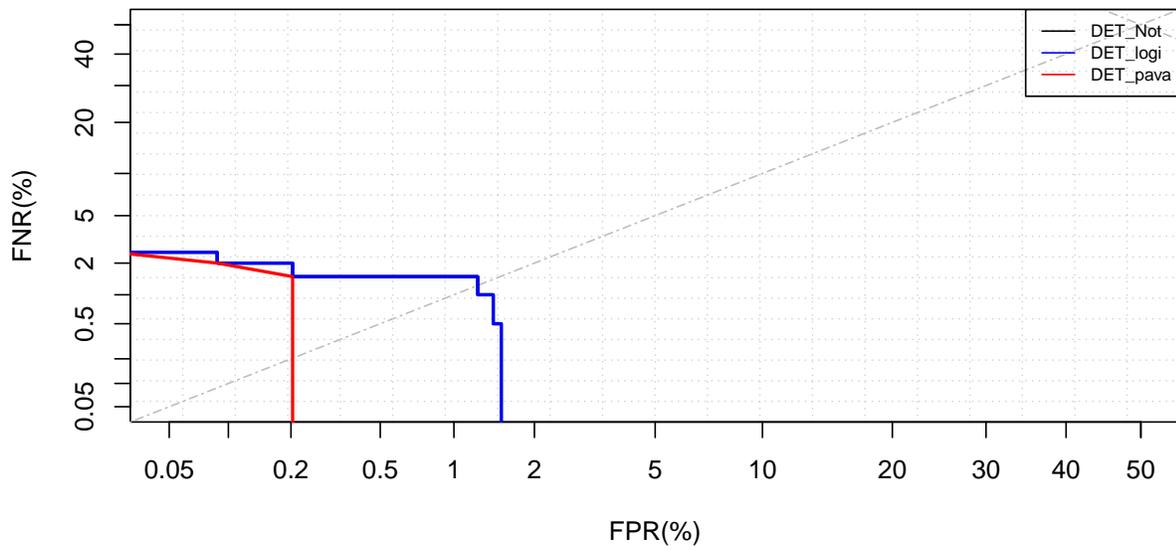


Figure 91: Courbes *DET* pour le cas 5VS234

### DET Curves.

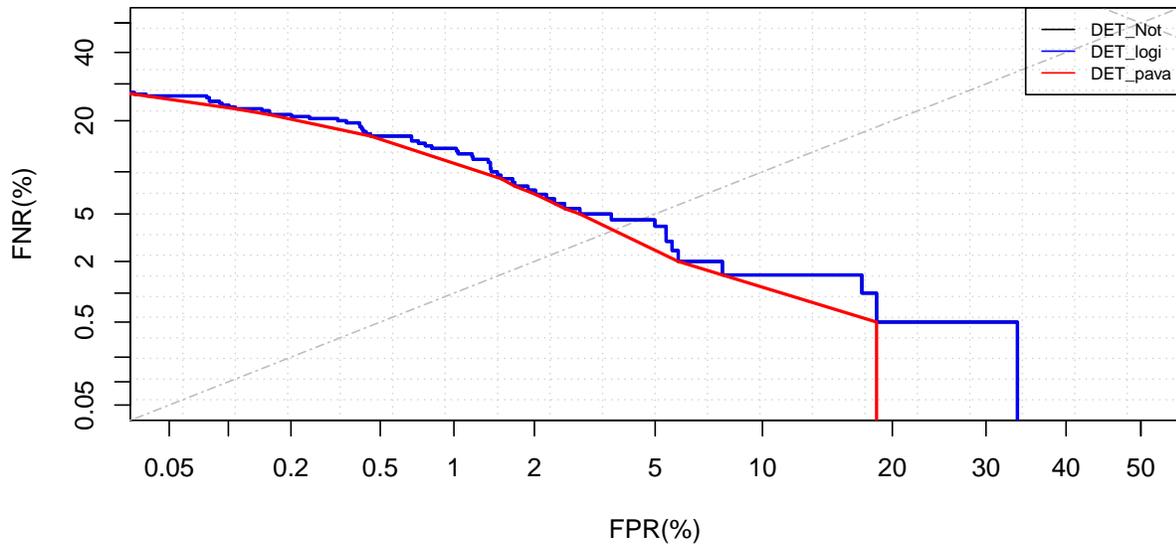


Figure 92: Courbes *DET* pour le cas 1VS2345

### DET Curves.

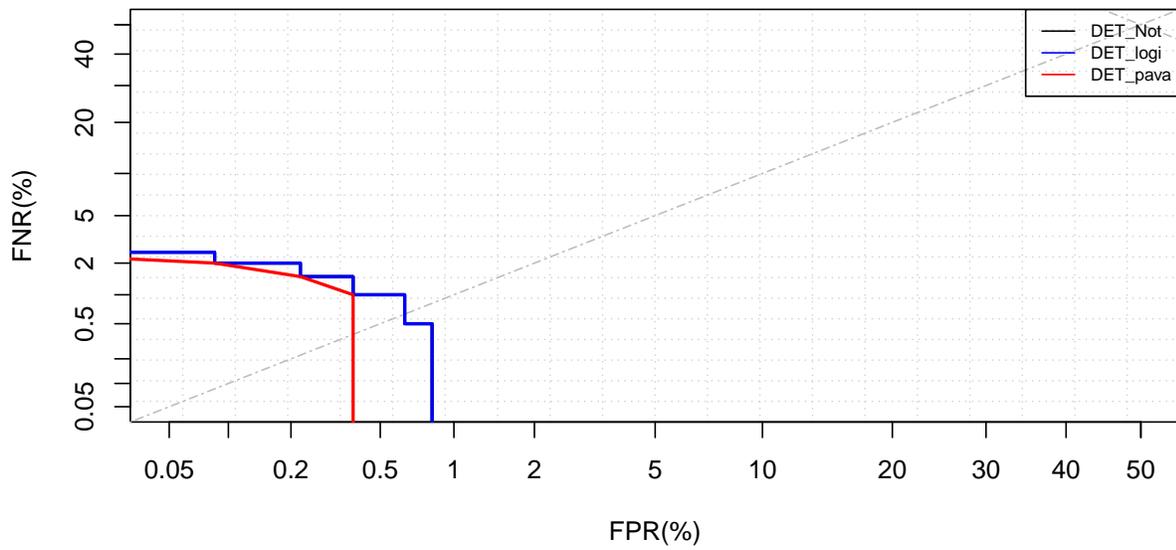


Figure 93: Courbes *DET* pour le cas 5VS1234

L'examen des courbes *ECE* permet de conclure que la méthode *PAVA* donne, dans tous les cas, des *LR* mieux calibrés que ceux calibrés obtenus par la régression logistique. Dans certains cas, les *LR* issus de la calibration par régression logistique sont moins calibrés que ceux non calibrés (voir par exemple les figures 75 et 77 pour les cas *5VS234* et *5VS1234*).

Les courbes *DET* montrent, dans tous les cas, le meilleur pouvoir discriminatoire du système calibré par *PAVA* par rapport à la régression logistique (qui est équivalente aux résultats sur la base des *LR* non calibrés.<sup>30</sup>

Les courbes de densité de probabilités des *LR* avant et après calibration montrent que la régression logistique n'affecte pas l'allure de ces fonctions, mais elle exerce de légères translations des courbes, sous *Hp* et *Hd*, vers la droite (les cas *5VS234* et *5VS1234*) ou vers la gauche (les cas *1VS234* et *1VS2345*).

Par contre, les allures des courbes de fonction de densité des *LR* calibrés par la méthode *PAVA* sont différentes de celles des *LR* non calibrés. La méthode *PAVA* a considérablement concentré les courbes sous *Hp* avec une translation vers la gauche, tandis que les courbes sous *Hd* ont été étendues avec une translation vers la droite. Le tout est obtenu en réduisant le degré de superposition entre ces deux courbes par rapport aux distributions *LR* non calibrées. Cette réduction du recouvrement entre les deux densités explique la diminution de l'erreur forensique *RME* et des taux de faux positifs et de faux négatifs (figure 94).

Diminuer les taux *FN* et *FP* permet d'augmenter le nombre des *LR* qui seront effectivement reportés si ce régime d'exclusion est adopté. La figure (95) illustre cette amélioration grâce à la calibration.

Un deuxième avantage de la calibration par la méthode *PAVA* réside dans le fait que la moyenne des valeurs des *LR* calibrés est sensiblement supérieure à celle des *LR* non calibrés<sup>31</sup> (voir figure 96)

Cela signifie que la méthode de calibration a renforcé les *LR* reportés devant l'autorité que cela soit sous *Hp* ou sous *Hd*.

En ce qui concerne, la figure 97 montre que la calibration par *PAVA* augmente le pourcentage des cas où il est possible de conclure une individualisation en appliquant la théorie de la décision dans les conditions spécifiées plus haut.

---

<sup>30</sup>Théoriquement, la calibration n'améliore pas le pouvoir discriminatoire. Dans le cas de cette recherche, cela a été vérifié pour la calibration par la régression logistique, mais pas pour la calibration par *PAVA*.

<sup>31</sup>Comme nous l'avons déjà indiqué, selon la littérature, la calibration n'affecte pas le pouvoir discriminatoire. Cela a été vérifié avec la calibration par la régression logistique. Cependant la calibration par *PAVA* a considérablement amélioré le pouvoir discriminatoire de la solution développée.

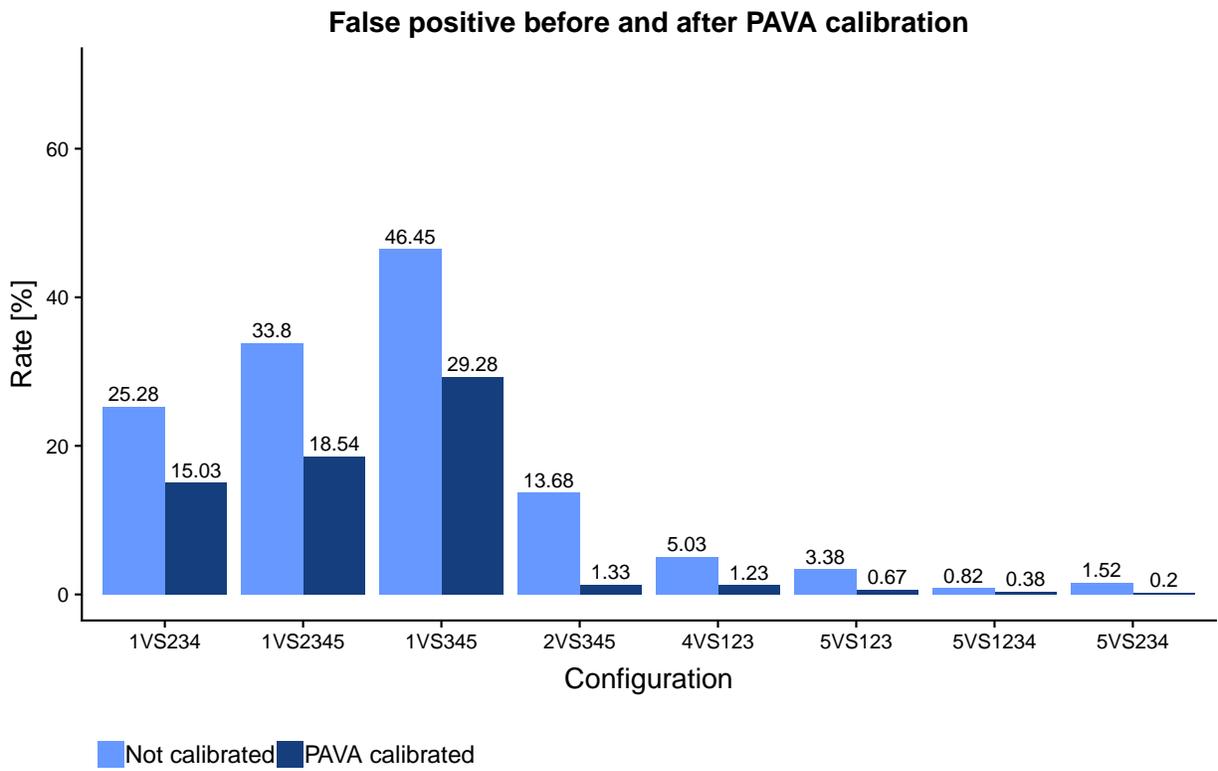
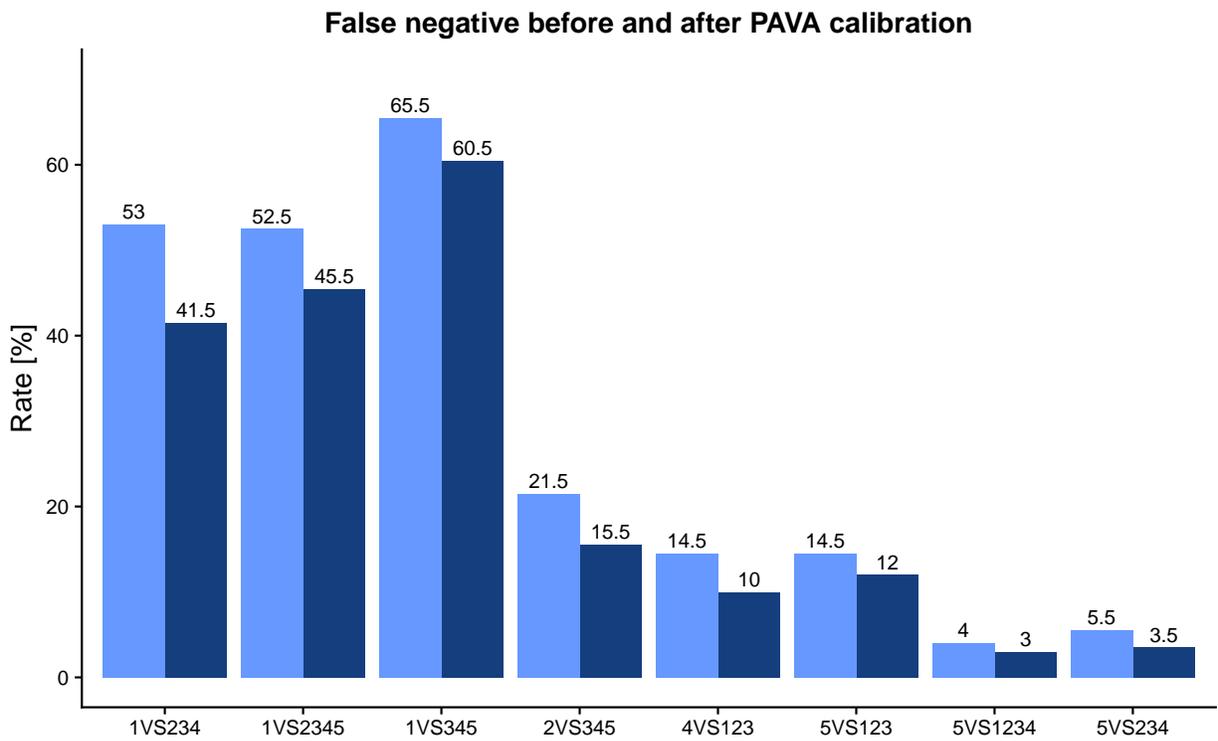


Figure 94: Taux de faux positifs et faux négatifs avant et après la calibration par la méthode *PAVA*.

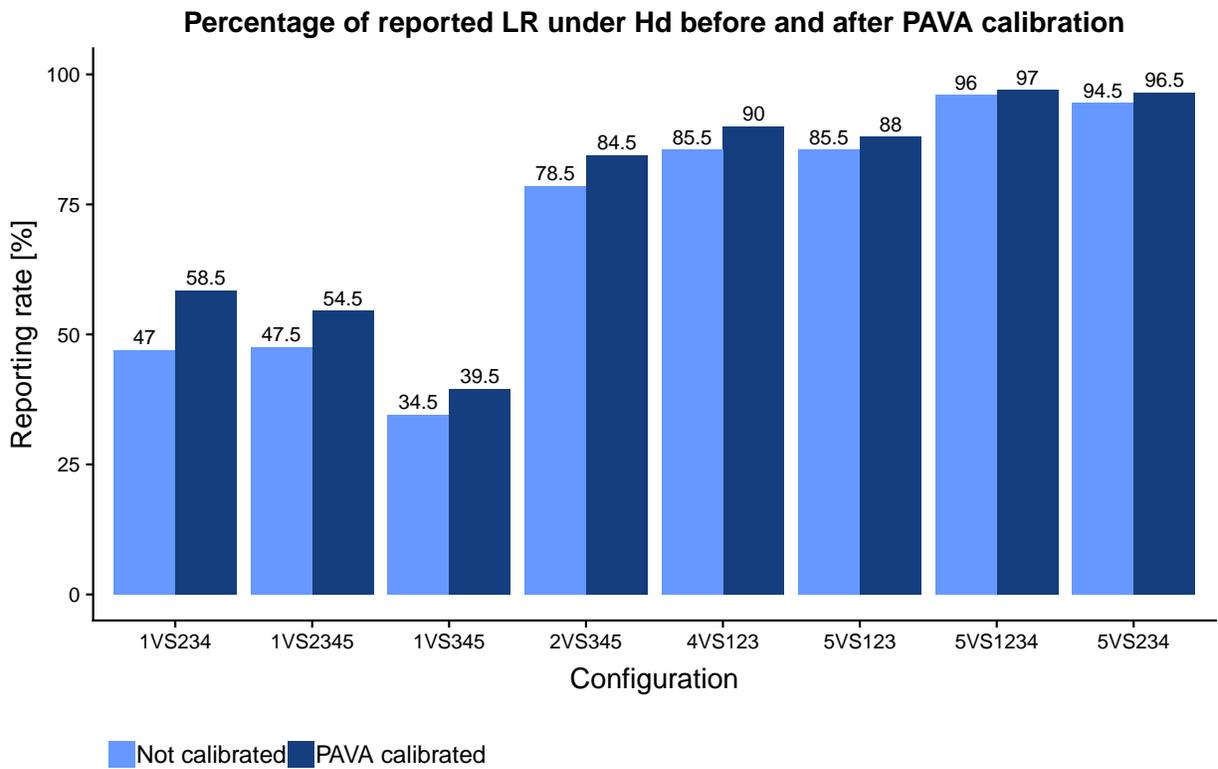
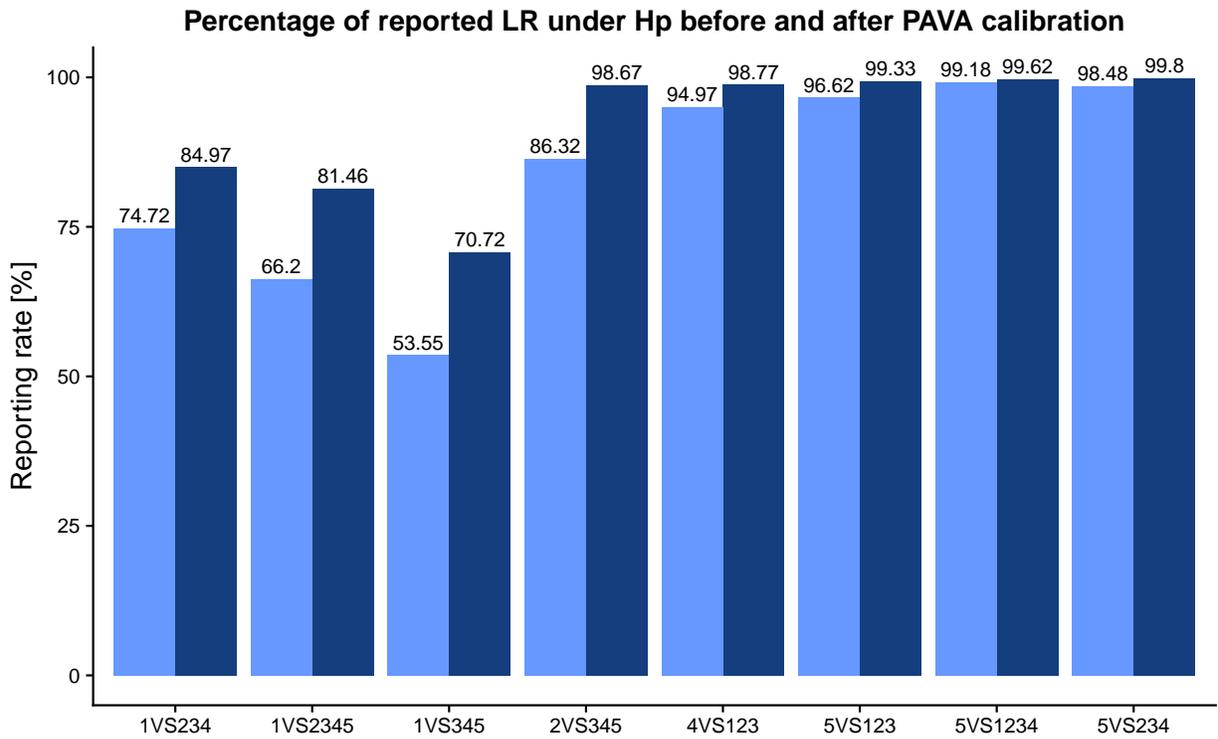


Figure 95: Taux de LR reportés avant et après la calibration par la méthode la méthode *PAVA*.

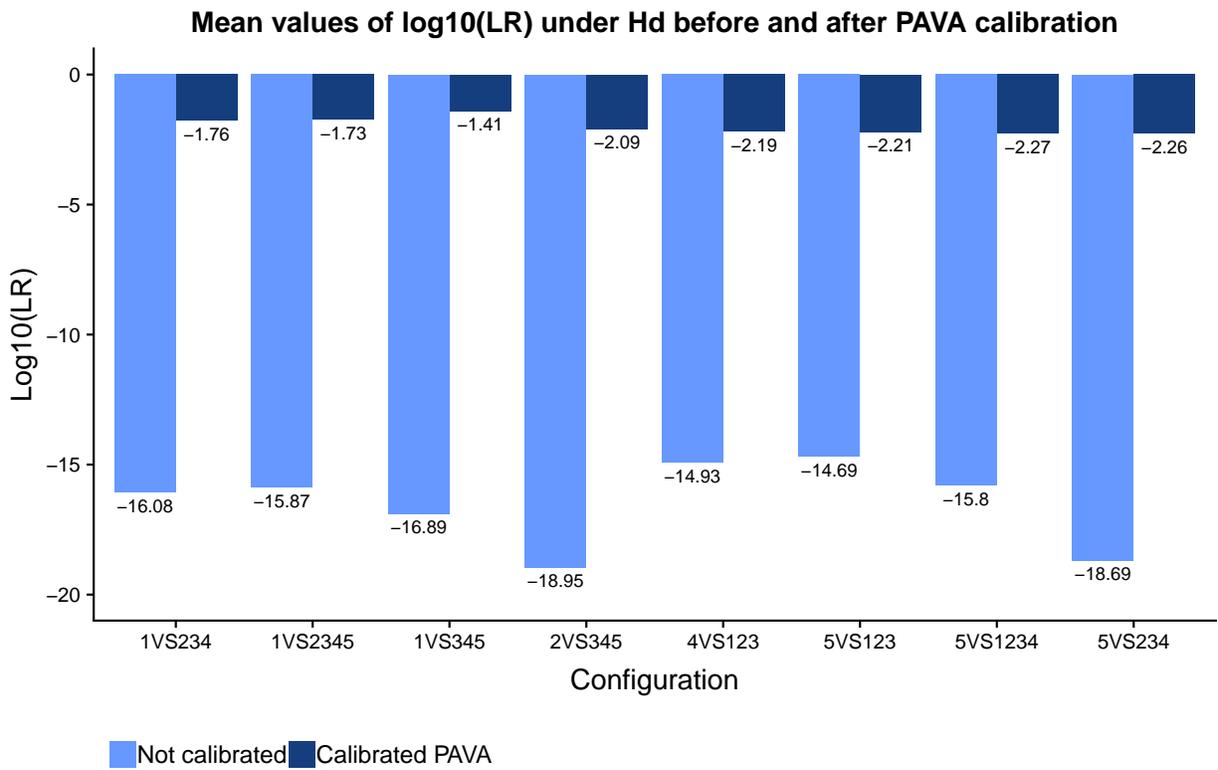
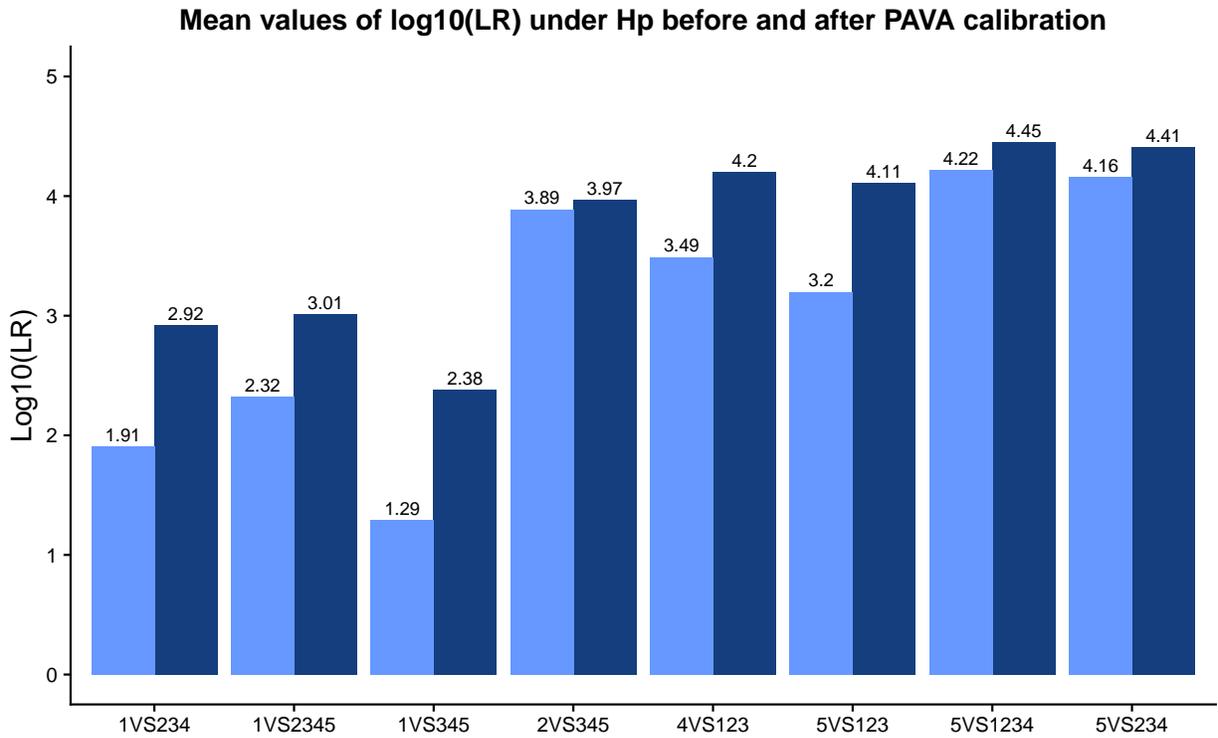


Figure 96: Valeurs moyennes du  $\log_{10}(LR)$  avant et après la calibration par la méthode *PAVA*. En haut: sous  $H_p$ . En bas: sous  $H_d$

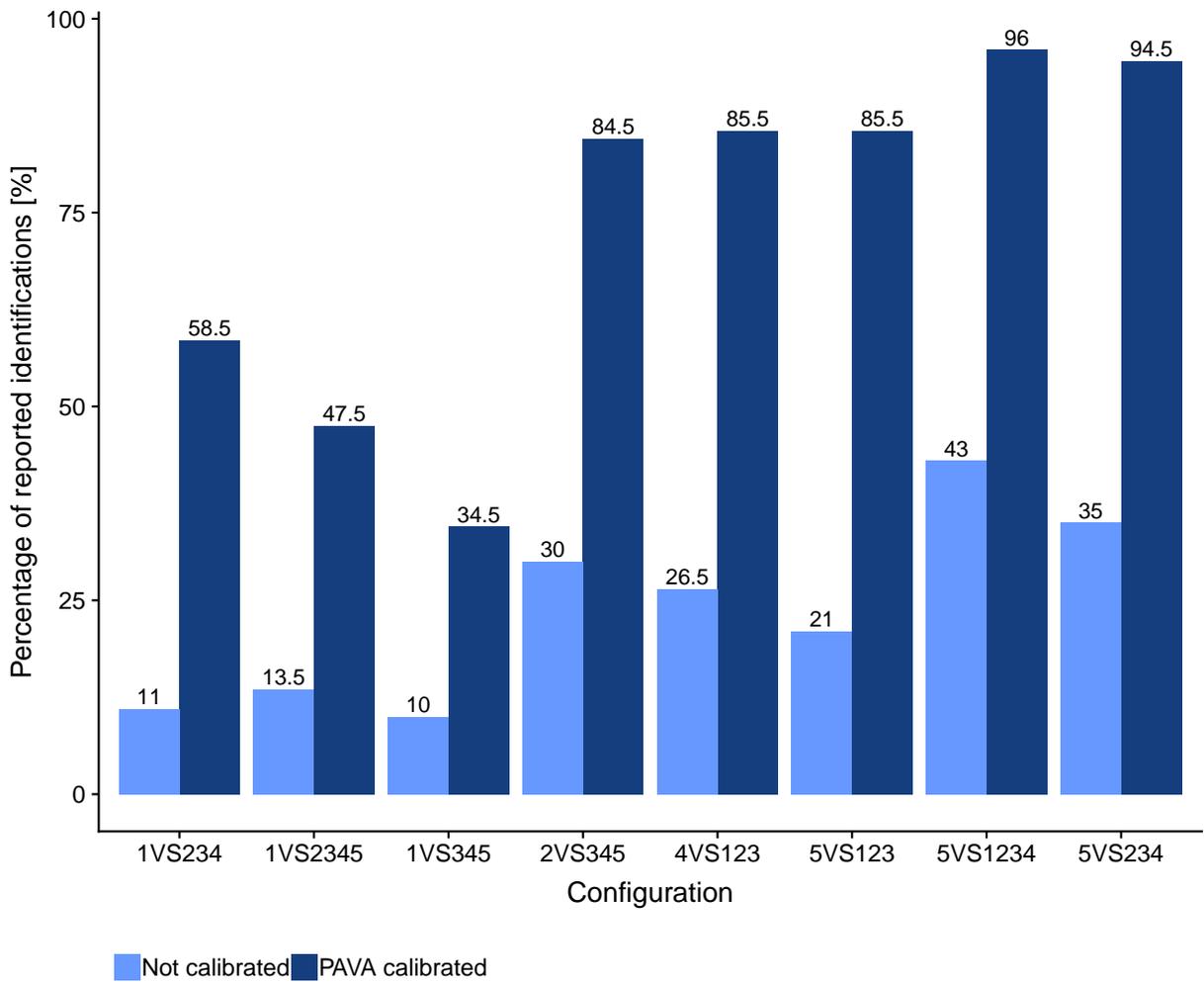


Figure 97: Taux de cas permettant l'individualisation selon les critères spécifiés avant et après la calibration par la méthode *PAVA*.

## 10 Conclusions et perspectives

### 10.1 Synthèse de la problématique

L'examen balistique des projectiles, à l'instar d'autres disciplines forensiques impliquant une comparaison d'images par un-e spécialiste, comme les examens en matière d'écritures et signatures, de traces papillaires ou de traces de semelles, a été et est toujours le sujet de critiques quant à son assise scientifique.

Ce débat a surtout été nourri principalement aux États-Unis d'Amérique (Committee to Assess the Feasibility Accuracy and National Ballistics Database 2008), (National Research Council 2009), (Spiegelman and Tobin 2012), (Tobin and Blau 2013) et (Advisors on Science & Technology 2016).

Au point où notamment les rapporteurs du rapport PCAST (Advisors on Science & Technology 2016) en arrivent à proposer son exclusion des tribunaux tant que la discipline ne puisse pas faire valoir des bases scientifiques ou empiriques (en situation contrôlée) plus solides.

Cela est principalement dû au caractère subjectif qui prédomine toutes les étapes de l'examen forensique, et, pour les USA, la difficulté de remplir les 5 critères de l'arrêt *Daubert* quant à l'admissibilité de la preuve technique. Il est utile de signaler que dans le but d'estimer le taux d'erreur faite par les experts en armes à feu dans l'expression de leurs opinions, plusieurs tests inter laboratoires ont également été réalisés Monson, Smith, and Peters (2023b). Il ressort que le risque d'erreur n'est pas nul.

En Europe, par contre, que ce soit dans les systèmes judiciaires de tradition accusatoire ou de tradition inquisitoire, le débat a été feutré et la discipline a bénéficié longtemps d'une aura d'infaillibilité et de scientificité, avant que la pratique européenne commence d'être encadrée à la fois en matière d'assurance qualité et en matière de recherche scientifique (C. L. M. ;. B. Mattijssen Erwin J. A. T.; Witteman 2020). Alors qu'aux USA, les spécialistes sont invité-e-s à adopter des expressions plus modestes dans l'expression de leurs conclusions (S. Cole and Biedermann 2020). La société américaine des sciences forensiques vient d'ailleurs de mettre en consultation un standard invitant à bannir des expressions suggérant la certitude absolue à la faveur d'une formulation qui s'apparente à l'expression d'un rapport de vraisemblance (Board 2021). En Europe, à l'exception de quelques laboratoires, la manière de conclure reste encore sur le statu quo, malgré les lignes directrices de l'ENFSI (Willis 2015) ou les récentes propositions la régulatrice anglaise des sciences forensiques (Chartered Society of Forensic Sciences and Royal Statistical Society 2021).

Tous les deux invitent à adopter une expression de la force des résultats sous la forme d'un rapport de vraisemblance.

L'objectif principal de cette thèse est de participer à la levée des réserves et des critiques qui entravent la discipline, par l'adoption d'une approche basée sur une analyse systématique de données empiriques, contrôlées et de manière le plus possible indépendante de l'utilisateur(-trice).

Le second catalyseur de cette recherche découle du constat que la plupart des laboratoires forensiques ont adopté "la strie" comme élément descripteur fondamental de la signature balistique du canon sur un projectile.

C'est sous l'influence de l'*AFTE*, que la comparaison entre les impressions de champ est dominée (comme pour les traces glissées) par la considération majoritaire des stries observées ou non observées. En cas de concordance, les stries viennent consolider l'opinion d'une identification. Lorsque des discordances sont observées, ces observations favorisent une exclusion. Or ce qu'est une strie ou ce qu'est une concordance ne sont jamais clairement définis.

Leur observation dépend tant des conditions d'éclairage, du grossissement et des zones exploitées par l'examineur. Le ou la spécialiste se base uniquement sur sa formation et son expérience, pour estimer sur les caractéristiques observées sont suffisantes pour conclure.

Finalement, la documentation proposée dans les rapports pour illustrer les observations est également sélectionnée afin de favoriser les éléments jugés pertinents et ignorer les différences jugées non significatives.

La dernière critique adressée à l'approche de l'*AFTE* est en lien avec la classification simpliste des traces laissées par l'arme sur le projectile, à savoir:

- Les caractéristiques *de fabrication* ou *de classe*, généralement macroscopiques et mesurables, laissées intentionnellement par le fabricant;
- Les caractéristiques dites *individuelles*, à savoir les stries horizontales, qui sont microscopiques et propres à chaque arme, et elles permettent l'identification, malgré les changements continus qu'elles subissent en raison des facteurs d'utilisation et de conservation; et
- Les caractéristiques de *sous-classe*, à savoir les stries présentent sur un nombre limité de canons usinés par le même outil, et qu'il n'est pas possible de différencier des caractéristiques dites individuelles définies plus haut.

Indépendamment de l'adoption de la strie comme seul élément de la signature balistique, dire que les caractéristiques microscopiques ont été laissées exclusivement par le canon est inexact, car il n'est pas possible d'assurer qu'une caractéristique microscopique, strie ou autre caractéristique, a été laissée par le canon et non pas par une autre cause.

Pour ce qui est des caractéristiques de sous-classe, il n'existe pas actuellement une méthode empirique ou analytique pour les distinguer des caractéristiques dites individuelles. Leur présence sur deux projectiles de sources inconnues ne permet pas de conclure que les deux canons ayant tiré ces deux projectiles ont été obligatoirement usinés dans la même série par le même outil, ou par le même fabricant. En effet, le soussigné a constaté empiriquement qu'il existe des ressemblances dans la comparaison entre des impressions de champs relevant des canons fabriqués à travers plusieurs pays sur des périodes différentes.

Cette recherche part donc du constat que la discipline est actuellement dominée par l'appréciation personnelle (et parfois obscure) des spécialistes, sans que les opinions exprimées à la suite des examens forensiques puissent être appréciées en toute transparence à la lumière de données empiriques étendues, reproductibles, indépendantes des opérateurs et sur la base de caractéristiques définies et mesurables.

## 10.2 Contribution de cette recherche

La contribution de cette thèse se décline sur les trois axes suivants:

### 10.2.1 Proposition d'un nouveau descripteur de la signature balistique

Dans cette recherche, la texture directionnelle a été proposée comme un nouveau descripteur de la signature balistique laissé par l'arme sur le projectile, à la place du descripteur actuelle utilisée par l'*AFTE*, à savoir la strie. Cette proposition a été faite suite à plusieurs comparaisons, effectuées par le soussigné, entre des projectiles tirés par les mêmes armes. Ces comparaisons ont permis de constater que la répartition de la texture directionnelle tout au long de l'impression de champ est plus reproductible que celle des stries, et que la texture directionnelle est nettement moins sensible aux conditions d'éclairage que les stries. La strie peut être représentée par une information locale de l'intensité lumineuse, pour une image  $2D$ , (ou un changement de la tangente de la surface pour les images  $3D$ ), par contre la texture directionnelle représente une information au niveau régional. L'information au niveau local (l'intensité lumineuse des pixels constituant la strie) est très sensible aux conditions d'éclairage, et que l'orientation de la texture directionnelle est quasi indépendante de ces conditions.

### 10.2.2 Développement d'un algorithme pour l'extraction de la signature balistique

Afin d'extraire la signature d'un champ de canon laissée sur un projectile, un algorithme spécifique a été développé. Il est caractérisé par les traitements séquentiels suivants : - un filtrage de l'image originale par les ondelettes  $2D$  pour obtenir l'image de la texture directionnelle ; - décomposition de l'image résultante et son image complémentaire, en bandes verticales ; - un filtrage et compression des bandes verticales par les ondelettes  $1D$  ; - la caractérisation de la signature balistique par l'utilisation du descripteur *HOG* ; - la modélisation de cette signature par le biais de l'apprentissage supervisé.

Cette solution développée, nommée *BulleText*, a été évaluée en elle-même et par rapport à d'autres systèmes commerciaux de rapprochement automatique entre les projectiles. Pour ce faire, un échantillon de 1140 projectiles tirés par 200 *AKM 47*, calibre  $7.62 \times 39$  mm. Cela représente au total 4560 impressions de champs saisis selon le protocole développé. Ces 1140 projectiles ont été également saisis dans deux autres systèmes automatiques, à savoir l'*IBIS TRAX3D*, installé à l'*INCC* de la Gendarmerie algérienne, et l'*EVOFINDER* installé à l'École des Sciences Criminelles (*ESC*) de l'Université de Lausanne. L'évaluation de l'efficacité du système développé s'est faite selon deux cadres d'utilisation :

**Primo** : l'axe investigatif, d'abord sur 30 configurations (spécifiant les conditions d'apprentissage et de test) ont été testés pour le scénario projectile-projectile. Dans ce cas la discrimination des projectiles est basée sur le score de prédiction par *SVM*. Puis dans 40 autres configurations pour le scénario projectile- armes, où la valeur du rapport de vraisemblance est calculée à partir de la prédiction effectuée par *RDA*. Ces performances ont été également comparées avec celles obtenues des systèmes *IBIS TRAX3D* et *EVOFINDER*.

Concernant le système *EVOFINDER*, deux hauteurs de fenêtre d'annotation ont été testées : une de  $0.22$  mm, telle suggéré par la société *ScannBi*, et une de  $0.50$  mm jugée par le soussigné comme couvrant mieux les caractéristiques microscopiques.

La comparaison des performances a abouti aux résultats suivants :

- *BulleText* est un système nettement plus performant que les deux autres systèmes, et ceci dans toutes les configurations et pour les deux cadres d'utilisation;
- Pour *EVOFINDER*, *IBIS TRAX3D* et *BulleText*, et dans toutes les configurations, le premier projectile, dans son utilisation dans le groupe d'apprentissage ou dans le test, a un effet considérablement négatif sur le taux de précision. Ceci peut être expliqué par le fait que le canon froid laisse des traces microscopiques un peu différentes de celles quand il est chaud. Cette observation qui devrait être prise en compte lors de la numérisation de projectiles tirés par des armes de guerre similaires à l'*AKM 47*;
- Il a été constaté pour tous les systèmes et pour toutes les configurations, que les projectiles ne se comportent pas comme des variables aléatoires indépendantes, mais plutôt des variables appartenant à une série temporelle, dans l'ordre chronologique est important;
- L'efficacité du système *EVOFINDER*, avec une fenêtre d'acquisition de hauteur de  $0.50$  mm, est meilleure qu'avec une fenêtre de hauteur de  $0.22$  mm.; Cet aspect devrait être pris en compte lors de la numérisation dans le système *EVOFINDER* de projectiles, notamment ceux tirés par des armes similaires à l'*AKM 47*;
- Pour les images *2D*, le système *EVOFINDER* est plus performant que le système *IBIS TRAX3D*. Cependant, pour les images tridimensionnelles, il nettement moins performant que le système *IBIS TRAX3D*. Cela est dû à la qualité des traces sur les l'image tridimensionnelle et/ou les algorithmes de comparaison et d'extraction de signatures, développés par *Forensic Technology*.

**Secundo** : l'axe évaluatif. À notre connaissance, le présent travail est le seul en matière d'examen des projectiles, a proposé une évaluation de la force des associations sur une large base de données (ici 200 armes) Les performances évaluatives, calculées sur plusieurs configurations, ont été mesurées par les taux d'erreur forensiques (*RMEP*, *RMED*, *FN* et *FP*) obtenus des transactions faites à partir de sources connues. Deux méthodes de calibration des valeurs de *LR*, à savoir la régression logistique et la méthode *PAVA*, ont été testées et comparées. C'est la méthode *PAVA* qui a montré les meilleures performances. Elle diminue significativement les quatre taux d'erreur susmentionnés.

### 10.2.3 Proposition d'une nouvelle approche de la discrimination de projectiles

Sur la base de cette nouvelle définition de la signature balistique, une nouvelle approche de la discrimination de projectile est proposée. Dans cette approche, les caractéristiques révélées sur un projectile sont subdivisées en deux catégories : – *les caractéristiques macroscopiques* qui regroupent le nombre des impressions de

champs et leurs largeurs, l'orientation et l'angle de ces impressions. - *les caractéristiques microscopiques* qui sont l'ensemble des textures directionnelles réparties sur les impressions de champs (et également les impressions de rayures). Ces caractéristiques sont dues au contact du projectile avec d'autres objets, entre autres le canon, avant, durant et après le tir.

L'approche proposée est ensuite essentiellement basée sur des données empiriques. Celles-ci sont organisées dans une base de données où chaque arme saisie est représentée. Les conclusions issues des examens systématiques des textures sont formulées de manière dépendante à la base de données. Il n'y a aucune affirmation de généralisation à d'autres types d'armes ou à des tailles de base de données plus grandes. La volonté affirmée dans cette recherche est de contraindre les conclusions à ce que l'on mesure sur des données existantes. En d'autres termes, les conclusions exprimées ont une assise qui est directement en lien avec les données empiriques accumulées. À chaque nouvelle arme, entrant dans le système, l'ensemble des probabilités sont recalculées à la lumière de cette entrée. Pour dire qu'une arme de la base de données est l'arme la plus probable comme ayant potentiellement tiré le projectile de question, il faut que le rapport de vraisemblance ( $LR$ ) de cette arme soit le plus grand  $LR$  obtenu de la comparaison entre la signature balistique du projectile en question et les modèles des signatures balistiques des armes potentielles en base. À noter que le  $LR$  est obtenu en divisant les chances a posteriori, obtenues suite une classification par apprentissage sur les  $N$  armes dans la base de données, par les chances a priori qui sont uniformes pour chacune des armes en base. Plus le classement de l'arme suspecte est loin de la première position, plus il est moins probable qu'elle soit à la source du tir. La conclusion d'une exclusion est seulement autorisée lorsqu'une différence est enregistrée au niveau des caractéristiques macroscopiques telles que définies plus haut.

L'approche proposée se démarque de celle adoptée par l'*AFTE* de la manière suivante :

- Au lieu de réaliser une seule comparaison, au niveau de stries, entre le projectile en question et les projectiles de référence d'une arme suspecte, dans l'approche proposée, le projectile en question va être comparé, au niveau des textures directionnelles, avec tous les modèles des signatures balistiques des armes potentielles, saisies dans une base de données. Autrement dit, la comparaison est systématique avec toutes les armes à disposition dans la base et pas uniquement avec l'arme ou les armes désignées d'intérêt.
- Au lieu d'amener à des conclusions catégoriques, l'approche proposée attribue un rapport de vraisemblance à chaque arme, y compris l'arme d'intérêt. Ce rapport de vraisemblance reflète la force de l'association entre cette arme et le projectile en question.
- Le taux d'erreur associé aux résultats obtenus est calculable à partir des proportions des faux classements aux premiers rangs des projectiles saisis dans la base de données, tirés par les mêmes armes. Les taux d'erreur forensiques (notamment *RMED* et *RMEP*) qualifient également la technique.

## 10.3 Perspectives

### 10.3.1 Amélioration du système *BulleText*

Une amélioration des performances de *BulleText* est envisageable sur quatre plans :

- Utiliser un environnement de numérisation 2D plus abouti que celui utilisé dans le protocole actuel. En effet, dans cette recherche, le choix initial du comparateur Leica utilisé et celui de la caméra faible résolution l'ont été par défaut, en raison de la disponibilité pour le soussigné de ce seul équipement. Les acquisitions faites par la suite sur le système *EVOFINDER* sont d'une qualité nettement supérieure en termes de résolution et de netteté. L'application des algorithmes développés dans cette recherche sur des images d'une telle qualité devrait assurer de meilleures performances.
- Augmenter les données pour chaque projectile par des acquisitions multiples (potentiellement automatisées) des images des champs en admettant des petites translations et rotations des images acquises. Cette procédure devrait permettre d'augmenter la représentation des champs et le calcul du modèle.

- Améliorer la modélisation de la signature balistique. Dans cette recherche, seulement des techniques de *machine learning* traditionnelles, ont été testées et comparées afin de sélectionner in fine la technique *RDA*. Un champ de recherche important s'ouvre si des techniques de fusion seraient adoptées ou si nous mettions en oeuvre des techniques d'apprentissage profond dans l'hypothèse évoquée plus haut où le nombre d'images d'apprentissage pourrait être augmenté.
- Améliorer le classement des armes en mode investigatif en exploitant non pas les *LR* non-calibrés comme actuellement, mais en tirant profit de la méthode de calibration *PAVA*. En mode évaluatif, la méthode *PAVA* a fait preuve de ses avantages et il est attendu qu'un reclassement basé sur une métrique calibrée serait encore plus efficace;
- Projeter l'aspect directionnel de la texture sur les données issues de l'acquisition par des 3D, et d'étudier la faisabilité de cartographier l'anisotropie de la rugosité de surface;
- Adapter l'application de la méthode développée sur les traces laissées par l'arme sur la douille, notamment celles de la tête de culasse.

### 10.3.2 Généralisation et application de la méthode développée

Le présent travail tente d'apporter plus d'objectivité à la discipline de l'examen des projectiles. Toutefois, malgré les excellentes performances montrées dans la mise à l'épreuve de la présente contribution, en mode investigatif et en mode évaluatif, il est prématuré d'envisager de l'introduire dans les pratiques courantes des laboratoires, sans une mise à l'épreuve avec d'autres calibres fréquents dans les affaires criminelles (notamment *9 mm* et *6.35 mm*) avec plusieurs marques de munitions et différents types de projectiles (chemisé ou non). Le soussigné est conscient que l'approche développée n'a été testée que dans le contexte des armes *AKM 47*. De plus, la volonté affirmée par la démarche adoptée ici est de s'en tenir à une formulation de conclusion sous la forme d'un *LR* basé uniquement sur des données disponibles. En conséquence, seules des expériences sur d'autres calibres et munitions apporteront la base nécessaire l'extension d'usage proposé ici. A priori toutefois, il n'y a aucun indicateur suggérant qu'une telle extension ne puisse pas être couronnée de succès.

Par contre, pour ce qui est du cas des armes de guerre *AKM 47*, l'application des résultats de la présente recherche en mode évaluatif est immédiate en faisant toutefois état en toute transparence des limitations suivantes : - La taille de la base de données (à ce stade, 200 armes à feu); - Le nombre de projectiles utilisé pour l'apprentissage du modèle (au minimum 3); - Le rapport de vraisemblance (*LR*) obtenu dans cette configuration en regard de l'arme en examen; - Les ordres de grandeur des taux d'erreur forensiques obtenus (*RMED* et *RMED*).

Nous avons montré dans cette recherche le comportement particulier du premier projectile tiré (projectile dit *froid*). Cette observation nous a permis d'affirmer le lien entre les caractéristiques microscopiques et la nature consécutive des tirs. C'est un élément qu'il s'agira d'apprécier de cas en cas. Dans la majorité des incidents de tir impliquant ce type d'arme, le nombre de tirs sur les lieux est supérieur à 1. Ainsi la considération des résultats obtenus pour l'ensemble des projectiles récupérés permettra de compenser cet effet négatif sur les performances.

Pour conclure, ce travail de recherche ouvre une voie prometteuse pour atténuer les critiques adressées à la discipline de la comparaison des projectiles en balistique forensique. En adoptant un descripteur de texture des caractéristiques microscopiques sur la surface des champs des projectiles, le domaine évite l'écueil traditionnel d'une focalisation sur les stries qualifiées d'*individuelles* et distinguables des caractéristiques dites de sous-classe.

L'adoption du rapport de vraisemblance tant en mode évaluatif qu'en mode investigatif uniformise la logique sous-jacente de la discipline et permet d'éviter des conclusions catégoriques que les données scientifiques actuelles ne permettent pas de justifier. Finalement le modèle algorithmique proposé permet une quantification des performances et une transparence sur les taux d'erreur. La méthode est très largement indépendante des opérateurs(-trices) et s'appuie exclusivement sur les données à disposition sans s'en remettre à l'appréciation non contrôlée d'un ou d'une spécialiste.

La recherche ouvre la voie à une présentation des résultats plus humble et soutenue par des données dans le domaine de spécialité. L'expression du rapport de vraisemblance obtenu (couplé aux erreurs forensiques obtenues durant les expérimentations contrôlées) devrait suffire aux décideurs judiciaires d'exploiter pleinement, et en toute connaissance de cause, l'élément technique apporté par le ou la spécialiste forensique.

## Bibliographie

- Advisors on Science & Technology, President's Council of. 2016. "Report to the President: Forensic Science in Criminal Courts: Ensuring Scientific Validity of Feature-Comparison Methods." Executive Office of the President. [https://obamawhitehouse.archives.gov/sites/default/files/microsites/ostp/PCAST/pcast\\_forensic\\_science\\_report\\_final.pdf](https://obamawhitehouse.archives.gov/sites/default/files/microsites/ostp/PCAST/pcast_forensic_science_report_final.pdf).
- AFTE Criteria for Identification Committee. 1992. "Theory of Identification, Range of Striae Comparison Reports and Modified Glossary of Definitions." *AFTE Journal* 24 (2): 336–40.
- Aitken Colin Graeme Girwood, Taroni Franco. 2004. *Statistics and the Evaluation of Evidence for Forensic Scientists*. 2nd ed. Chichester, England: John Wiley & Sons, Ltd.
- Aitken, Colin Graeme Girwood, Franco Taroni, and Silvia Bozza. 2020. *Statistics and the Evaluation of Evidence for Forensic Scientists*. 3rd ed. Statistics in Practice. Chichester: John Wiley & Sons Ltd.
- Bachrach, Benjamin. 2002. "Development of a 3d-Based Automated Firearms Evidence Comparison System." *Journal of Forensic Sciences* 47 (6): 1253–64.
- Baiker, Martin, Isaac Keereweer, René Pieterman, Erwin Vermeij, Jaap van der Weerd, and Peter Zoon. 2014. "Quantitative Comparison of Striated Toolmarks." *Forensic Science International* 242: 186–99.
- Baldwin, Stanley J.; Morris, David P; Bajic. 2014. "A Study of False-Positive and False-Negative Error Rates in Cartridge Case Comparisons." Ames Laboratory, U.S. Department of Defense. <https://www.ncjrs.gov/pdffiles1/nij/249874.pdf>.
- Banno, Atsuhiko, Tomohito Masuda, and Katsushi Ikeuchi. 2004. "Three Dimensional Visualization and Comparison of Impressions in Fired Bullets." *Forensic Science International* 140 (2-3): 233–40.
- Biasotti, Alfred A. 1959. "A Statistical Study of Individual Characteristics of Fired Bullets." *Journal of Forensic Sciences* 4 (1): 34–50.
- Biasotti, Alfred A., and John Murdock. 1984. "Criteria for Identification" or "State of the Art" of Firearm and Toolmark Identification." *AFTE Journal* 16 (4): 16–34.
- . 1997. "Firearms and Toolmarks Identification: Scientific Status, §23-2." In *Modern Scientific Evidence: The Law and Science of Expert Testimony*, edited by David L. Faigman, David H. Kaye, Michael J. Saks, and Joseph Sanders, 2:55–78. St. Paul, Minn.: West Publishing Co.
- Biedermann, Alex, Silvia Bozza, and Franco Taroni. 2008. "Decision Theoretic Properties of Forensic Identification: Underlying Logic and Argumentative Implications." *Forensic Science International* 177 (2-3): 120–32.
- . 2016. "The Decisionalization of Individualization." *Forensic Science International* 266: 29–38.
- Bigdeli, Saeed, and Mohsen Ebrahimi Moghaddam Hamed Danandeh. 2017. "A Correlation Based Bullet Identification Method Using Empirical Mode Decomposition." *Forensic Science International* 278: 351–60.
- Board, AAFS Standards. 2021. "Standard Scale of Source Conclusions Criteria for Toolmark Examinations - DRAFT." ASB Standard 100. AAFS Standards Board. <https://www.aafs.org/asb-standard/standard-scale-source-conclusions-criteria-toolmark-examinations>.
- Bolton-King, Rachel, M. Bencsik, J. Evans, C. L. Smith, Derek F. Allsop, J. Painter, and W. Cranton. 2012. "Numerical Classification of Curvilinear Structures for the Identification of Pistol Barrels." *Forensic Science International* 220 1-3: 197–209.
- Bonfanti, Monica S., and R. I. Ghauharali. 2000. "Visualisation by Confocal Microscopy of Traces on Bullets and Cartridge Cases." *Science & Justice* 40 (4): 241–56.
- Bunch, Stephen, and Gerhard Wevers. 2013. "Application of Likelihood Ratios for Firearm and Toolmark Analysis." *Science & Justice* 53 (2): 223–29.
- Champod, Christophe, Dave Baldwin, Franco Taroni, and John S. Buckleton. 2003. "Firearm and Tool Marks Identification: The Bayesian Approach." *AFTE Journal* 35 (3): 307–16.
- Champod, Christophe, Christopher J. Lennard, Pierre A. Margot, and Milutin Stoilovic. 2016. *Fingerprints and Other Ridge Skin Impressions*. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press.
- Chartered Society of Forensic Sciences, The Forensic Science Regulator in partnership with the, and the Royal Statistical Society. 2021. "Development of Evaluative Opinions: Codes of Practice and Conduct for Forensic Service Providers." Forensic Science Regulator. <https://www.gov.uk/government/publications/development-of-evaluative-opinions>.
- Choraś, Ryszard S. 2013. "Texture Based Firearm Striations Analysis for Forensics Image Retrieval." In

- Image Processing and Communications Challenges 4*, edited by Ryszard S. Choraś, 25–31. Springer Berlin Heidelberg.
- Chu, Wei, John Song, Theodore Vorburger, and Susan Ballou. 2010. “Striation Density for Predicting the Identifiability of Fired Bullets with Automated Inspection Systems.” *Journal of Forensic Sciences* 55 (5): 1222–26.
- Chu, Wei, John Song, Theodore Vorburger, James Yen, Susan Ballou, and Benjamin Bachrach. 2010. “Pilot Study of Automated Bullet Signature Identification Based on Topography Measurements and Correlations.” *Journal of Forensic Sciences* 55 (2): 341–47.
- Cole, Simon A. 2014. “Individualization Is Dead, Long Live Individualization! Reforms of Reporting Practices for Fingerprint Analysis in the United States.” *Law, Probability & Risk* 13 (2): 117–50.
- Cole, Simon, and Alex Biedermann. 2020. “How Can Forensic Result Be a ‘Decision?’” *Houston Law Review* 57: 551–92.
- Committee to Assess the Feasibility Accuracy, National Research Council -, and Technical Capability of a National Ballistics Database. 2008. *Ballistic Imaging*. Washington DC: National Research Council.
- Dalal, Navneet, and Bill Triggs. 2005. “Histograms of Oriented Gradients for Human Detection.” In *2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR’05)*, 1:886–893 vol. 1.
- De Ceuster, Jan, and Sylvain Dujardin. 2015. “The Reference Ballistic Imaging Database Revisited.” *Forensic Science International* 248: 82–87.
- De Kinder, Jan, and Monica S. Bonfanti. 1999. “Automated Comparisons of Bullet Striations Based on 3d Topography.” *Forensic Science International* 101 (2): 85–93.
- De Kinder, Jan, Pascal Prevot, Marc Pirlot, and Bart Nys. 1998. “Surface Topology of Bullet Striations: An Innovative Technique.” *AFTE Journal* 30 (2): 294–99.
- Dehak, Najim, Réda Dehak, Patrick Kenny, Niko Brümmer, Pierre Ouellet, and Pierre Dumouchel. 2009. “Support vector machines versus fast scoring in the low-dimensional total variability space for speaker verification.” In *Proc. Interspeech 2009*, 1559–62. <https://doi.org/10.21437/Interspeech.2009-385>.
- Demoli, N., K. Sariri, Z. Stanic, V. Mastruko, and O. Milat. 2004. “Toolmarks Identification Using SEM Images in an Optoelectronic Correlator Device.” *Optik - International Journal for Light and Electron Optics* 115 (11-12): 487–92.
- Department of Justice, U. S. A. 2018. “Approved Uniform Language for Testimony and Reports for the Forensic Firearms/Toolmarks Discipline Pattern Match Examination.” <https://www.justice.gov/olp/page/file/1083671/download>.
- Egli, Nicole M. 2009. “Interpretation of Partial Fingermarks Using an Automated Fingerprint Identification System.” Thèse de doctorat, Ecole des Sciences Criminelles, Université de Lausanne.
- Eldridge, Heidi. 2020. “Understanding, Expanding, and Predicting the Suitability Decision in Friction Ridge Analysis.” Thèse de doctorat, Ecole des Sciences Criminelles, Université de Lausanne.
- Firearms, and Organization of Scientific Area Committees (OSAC) for Forensic Science Toolmarks Subcommittee Physics/Pattern Interpretation Scientific Area Committee. 2019. “Standard Scale of Source Conclusions and Criteria for Toolmark Examinations.” <https://www.nist.gov/document/range-source-conclusions-and-criteria-toolmark-examinations>.
- Gardner, Groffrey. 1978. “Computer Identification of Bullets.” *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics* 8 (1): 69–76.
- Girod, Alexandre, Christophe Champod, and Olivier Ribaux. 2008. *Traces de souliers*. Lausanne: Presses polytechniques et universitaires romandes.
- Gonzalez, Rafael C., Richard E. Woods, and Steven L. Eddins. 2003. *Digital Image Processing Using MATLAB*. USA: Prentice-Hall, Inc.
- Hare, Eric, Heike Hofmann, and Alicia Carriquiry. 2017. “Automatic Matching of Bullet Lands.” *Annals of Applied Statistics* 11 (4): 2332–56.
- Heizmann, Michael, and Fernando Puente León. n.d. “Automated Analysis and Comparison of Striated Toolmarks.” In *Proceedings / Fourth European Meeting for Shoe Print, Tool Mark Examiners, SPTM 2001, May 15 - 18, 2001*. Ed.: H. Katterwe, 121–32. BKA.
- Hesar, Hamed Danandeh, S. Bigeli, and M. Ebrahimi Moghaddam. 2019. “A Bayesian Approach Based on Kalman Filter Frameworks for Bullet Identification.” *Science & Justice* 59: 390–404.
- Hicklin, Austin. 2017. “Improving the Rigor of the Latent Print Examination Process.” Thèse de doctorat,

- Ecole des Sciences Criminelles, Université de Lausanne.
- Hofmann, Heike, Alicia Carriquiry, and Susan Vanderplas. 2020. "Treatment of Inconclusives in the AFTE Range of Conclusions." *Law, Probability and Risk* 19 (3-4): 317–64.
- Jacquet, Maëlig. 2021. "Interprétation Des scores de reconnaissance faciale automatique pour l'investigation et le tribunal." Thèse de doctorat, Ecole des Sciences Criminelles, Université de Lausanne.
- Jing, Lu, Wu Shi-Hong, Yang Ke-Cheng, and Xia Min. 2014. "Automated Bullet Identification Based on Striation Feature Using 3d Laser Color Scanners." *Optik Journal* 125 (10): 2270–73.
- Kaye, David H. 2020. "Mysteries of the Department of Justice's ULTR for Firearm-Toolmark Pattern Examinations." <http://for-sci-law.blogspot.com/2020/11/mysteries-of-department-of-justices.html?m=1>.
- Kerckhoff, Wim, Reinoud D. Stoel, Erwin J. A. T. Mattijssen, and Rob Hermesen. 2013. "The Likelihood Ratio Approach in Cartridge Case and Bullet Comparison." *AFTE Journal* 45 (3): 284–89.
- Kirby, Shane J. 1983. "Comparison of 900 Consecutively Fired Bullets and Cartridge Cases from a 455 Caliber s&w Revolver." *AFTE Journal* 15 (3): 113–26.
- Kuhn, Max. 2008. "Building Predictive Models in r Using the Caret Package." *Journal of Statistical Software* 28 (5): 26.
- Langenburg, Glenn. 2012. "A Critical Analysis and Study of the ACE-v Process." Thèse de doctorat, Ecole des Sciences Criminelles, Université de Lausanne.
- Law, Eric F., and Keith B. Morris. 2021. "Evaluating Firearm Examiner Conclusion Variability Using Cartridge Case Reproductions." *Journal of Forensic Sciences* 66 (5): 1704–20.
- Li, Dongguang. 2006. "Ballistics Projectile Image Analysis for Firearm Identification." *IEEE Transactions on Image Processing* 15 (10): 2857–65.
- Li, Yuesong, Sheng Lin, Yaping Luo, and Zhongliang Mi. 2019. "Performance Evaluation of a Registered Ballistic Database Using the Evofinder(r) System." *Journal of Forensic Sciences* 64 (5): 1335–44.
- Lilian, Ryan. 2019. "Firearm Forensics Black-Box Studies for Examiners and Algorithms Using Measured 3d Surface Topographies." *National Criminal Justice Reference Service*. <https://www.ojp.gov/library/publications/firearm-forensics-black-box-studies-examiners-and-algorithms-using-measured-3d>.
- Lin, Ming-Feng, and Che-Yen Wen. 2010. "Similarity Measurement of Striation Marks Based Upon the Longest Common Subsequence Method." *Forensic Science Journal* 9 (1): 35–52.
- Lindley, Dennis V. 1977. "Probability and the Law." *The Statistician* 26 (3): 203–20.
- Lindsay, David. 2000. "The Effect of Powder Load and Bullet Material on an Identification." *AFTE Journal* 32 (3): 271–76.
- Lomoro, Vincent J. 1972. "32 SWL Caliber F.I.E. Corporation Titanic Revolver." *AFTE Journal* 4 (20): 46.
- Ma, Li, John Song, Eric Whinton, Alan Zheng, Theodore Vorburger, and Jack Zhou. 2004. "NIST Bullet Signature Measurement System for RM (Reference Material) 8240 Standard Bullets." *Journal of Forensic Sciences* 49 (4): 649–59.
- Marquis, Raymond. 2007. "Etude de caractères manuscrits : de la caractérisation morphologique à l'individualisation du scripteur." Thèse de doctorat, Ecole des Sciences Criminelles, Université de Lausanne.
- Martin, Alvin, George Doddington, Terri Kamm, Mark Ordowski, and Mark Przybocki. n.d. "The DET Curve in Assessment of Detection Task Performance." In *Proc. Eurospeech '97*, 4:1895–98.
- Mattijssen, Cilia L. M.; Berger, Erwin J. A. T.; Witteman. 2020. "Validity and Reliability of Forensic Firearm Examiners." *Forensic Science International* 307. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2019.110112>.
- Mattijssen, Erwin J. A. T., Cilia L. M. Witteman, Charles E. H. Berger, Xiaoyu A. Zheng, Johannes A. Soons, and Reinoud D. Stoel. 2021b. "Firearm Examination: Examiner Judgments and Computer-Based Comparisons." Journal Article. *Journal of Forensic Sciences* 66 (1): 96–111. <https://doi.org/10.1111/1556-4029.14557>.
- . 2021a. "Firearm Examination: Examiner Judgments and Computer-Based Comparisons." *Journal of Forensic Sciences* 66 (1): 96–111.
- McClarín, Derrick S. 2015. "Adding an Objective Component to Routine Casework: Use of Confocal Microscopy for the Analysis of 9mm Caliber Bullets." *AFTE Journal* 47 (3): 161–70.

- Meuwly, Didier. 2001. “Reconnaissance de locuteurs en sciences forensiques - l’apport d’une approche Automatique.” Thèse de doctorat, Institut de Police Scientifique et de Criminologie, Université de Lausanne.
- Meuwly, Didier, Daniel Ramos, and Rudolf Haraksim. 2017. “A Guideline for the Validation of Likelihood Ratio Methods Used for Forensic Evidence Evaluation.” *Forensic Science International* 276: 142–53.
- Miller, Jerry. 1998. “Criteria for Identification of Toolmarks.” *AFTE Journal* 30 (1): 15–61.
- . 2000. “Criteria for Identification of Toolmarks Part II\* Single L and Impression Comparisons.” *AFTE Journal* 32 (2): 116–31.
- Monkres, Jeremy, Christopher Luckie, Nicholas D. K. Petraco, and Allison Milam. 2013. “Comparison and Statistical Analysis of Land Impressions from Consecutively Rifled Barrels.” *AFTE Journal* 45 (1): 3–20.
- Monson, Keith L., Erich D. Smith, and Stanley J. Bajic. 2022. “Planning, Design and Logistics of a Decision Analysis Study: The FBI/Ames Study Involving Forensic Firearms Examiners.” *Forensic Science International: Synergy* 4: 100221. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fsisyn.2022.100221>.
- Monson, Keith L., Erich D. Smith, and Eugene M. Peters. 2023a. “Accuracy of Comparison Decisions by Forensic Firearms Examiners.” Journal Article. *Journal of Forensic Sciences* 68 (1): 86–100. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/1556-4029.15152>.
- . 2023b. “Repeatability and Reproducibility of Comparison Decisions by Firearms Examiners.” Journal Article. *Journal of Forensic Sciences* 68 (5): 1721–40. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/1556-4029.15318>.
- Moran, Bruce. 2001. “The Application of Numerical Criteria for Identification in Casework Involving Magazine Marks and Rifling Impressions.” *AFTE Journal* 33 (1): 41–46.
- . 2003. “Comments and Clarification of Responses from a Member of the AFTE 2001 Criteria for Identification of Toolmarks Discussion Panel.” *AFTE Journal* 35 (1): 55–65.
- Murdock, John E. 1981. “A General Discussion of Gun Barrel Individuality and an Empirical Assessment of the Individuality of Consecutively Button Rifled .22 Caliber Rifle Barrels.” *AFTE Journal* 13 (3): 84–111.
- National Research Council. 2009. *Strengthening Forensic Science in the United States: A Path Forward*. Washington, D.C.: The National Academies Press.
- Nichols, Ronald G. 2007. “Defending the Scientific Foundations of the Firearms and Tool Mark Identification Discipline: Responding to Recent Challenges.” *Journal of Forensic Sciences* 52 (3): 586–94.
- Pasquier, Julien. 2018. “Exploitation des traces de semelles dans la lutte contre la délinquance sérieuse : conception et apport d’une banque de données dans Le cadre du renseignement forensique.” Thèse de doctorat, Ecole des Sciences Criminelles, Université de Lausanne.
- Pirilot, Marc, André Chabottier, Eduard A. Celens, Jan De Kinder, and Philippe Van Ham. 1999. “Feature Extraction of Optical Projectiles Images.” *Science & Justice* 39 (1): 53–56.
- Pisantanaroj, Patranit, Pimlapus Tanpisuth, Piyawut Sinchawanwat, Siriporn Phasuk, Phongphan Phienphanich, Parinton Jangtawee, Kittisak Yakoompai, Montri Donphoongpi, Sanong Ekgasit, and Charturong Tantibundhit. 2020. “Automated Firearm Classification from Bullet Markings Using Deep Learning.” *IEEE Access* 8: 78236–51.
- Puente León, Fernando. 2006. “Automated Comparison of Firearm Bullets.” *Forensic Science International* 156 (1): 40–50.
- Rahm, Joachim. 2012. “Evaluation of an Electronic Comparison System and Implementation of a Quantitative Effectiveness Criterion.” *Forensic Science International* 214 (1): 173–77.
- Ramos, Daniel, and Joaquin Gonzalez-Rodriguez. 2013. “Reliable Support: Measuring Calibration of Likelihood Ratios.” *Forensic Science International* 230 (1–3): 156–69.
- Ramos-Castro, Daniel., J. Gonzalez-Rodriguez, and J. Ortega-Garcia. n.d. “Likelihood Ratio Calibration in a Transparent and Testable Forensic Speaker Recognition Framework.” In *Speaker and Language Recognition Workshop, 2006. IEEE Odyssey 2006: The*, 1–8.
- Riva, Fabiano. 2011. “Etude sur la valeur indicielle des trace présentes sur les douilles.” Thèse de doctorat, Ecole des Sciences Criminelles, Université de Lausanne.
- Robertson, Bernard, G. A. Vignaux, and Charles E. H. Berger. 2016. *Interpreting Evidence – Evaluating Forensic Science in the Courtroom*. 2nd ed. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd.
- RStudio Team. 2022. *RStudio: Integrated Development Environment for r*. Boston, MA: RStudio, PBC. <http://www.rstudio.com/>.

- Ruprecht, Nennstiel, and Joachim Rham. 2006. "An Experience Report Regarding the Performance of the IBIS™ Correlator." *Journal of Forensic Sciences* 51 (1): 24–30.
- S., Evett Ian W.; Lambert Jim A.; Buckleton John S.; Weir Bruce. 1996. "Statistical Analysis of STR Data." In, edited by Angel Carracedo and Walter Bernd Brinkmann, 79–86. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- ScannBI. 2010. Web Page. <http://evofinder.com/company/odyssey-project/>.
- Schwartz, Adina. 2005a. "A Systemic Challenge to the Reliability and Admissibility of Firearms and Toolmark Identification." *The Columbia Science and Technology Law Review* 6: 1–42.
- . 2005b. "Ballistics Recognition and Identification Systems." In *Encyclopedia of Law Enforcement*, edited by Larry E. Sullivan and Dorothy Moses Schulz, 2:551–55. Thousand Oaks, CA: SAGE Publications, Inc.
- Skolrood, Richard W. 1975. "Comparison of Bullets Fired from Consecutively Rifled Cooley. 22 Calibre Barrels." *Canadian Society of Forensic Science Journal* 8 (2): 49–52.
- Snyder, David, Daniel Garcia-Romero, Gregory Sell, Daniel Povey, and Sanjeev Khudanpur. 2018. "X-Vectors: Robust DNN Embeddings for Speaker Recognition." In *2018 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, 5329–33. <https://doi.org/10.1109/ICASSP.2018.8461375>.
- Song, Jaqui, Theodore Vorburger, T. B. Renegar, Hyug-Gyo Rhee, Xiaoyu Zheng, Li Ma, John Libert, S. Ballou, Benjamin Bachrach, and K. Bogart. 2006. "Correlation of Topography Measurements of NIST SRM 2460 Standard Bullets by Four Techniques." *Measurement Science and Technology* 17: 500–503.
- Song, Jun-Feng. 2013. "Proposed "NIST Ballistics Identification System (NBIS)" Based on 3d Topography Measurements on Correlation Cells." *AFTE Journal* 45 (2): 184–94.
- Spiegelman, Clifford, and William A. Tobin. 2012. "Analysis of Experiments in Forensic Firearms/Toolmarks Practice Offered as Support for Low Rates of Practice Error and Claims of Inferential Certainty." *Law, Probability & Risk* 12 (2): 115–33.
- Stein, Darrell, and Jorn Chi Chung Yu. 2013. "The Use of Near-infrared Photography to Image Fired Bullets and Cartridge Cases." *Journal of Forensic Sciences* 58 (5): 1330–35.
- Tibbs, United States v. 2019. Case. Superior Court of the District of Columbia, Criminal Division, Case No. 2016 CF1 19431.
- Tobin, William A., and Peter J. Blau. 2013. "Hypothesis Testing of the Critical Underlying Premise of Discernible Uniqueness in Firearms-Toolmarks Forensic Practice." *Jurimetrics Journal* 53 (Winter): 121–42.
- Tontarski, Richard E., and Robert M. Thompson. 1998. "Automated Firearms Evidence Comparison: A Forensic Tool for Firearms Identification – an Update." *Journal of Forensic Sciences* 43 (3): 641–47.
- Uchiyama, Tsuneo. 1988. "A Criterion for Land Mark Identification." *AFTE Journal* 20 (3): 236–51.
- "US v. Chaz Glynn." 2008. United States District Court, S.D. New York, Case 578 F.Supp. 2d 567.
- "US v. Marlon Williams." 2019. Case. District of Columbia Court of Appeals, Case No. 13-CF-1312.
- Wickham, Hadley et al. n.d. "Welcome to the Tidyverse." *Journal of Open Source Software* 4 (43): 1686.
- Willis, Liouse.; McDermott, Sheila M.; McKenna. 2015. "ENFSI Guideline for Evaluative Reporting in Forensic Science." European Network of Forensic Science Institutes. [http://enfsi.eu/wp-content/uploads/2016/09/m1\\_guideline.pdf](http://enfsi.eu/wp-content/uploads/2016/09/m1_guideline.pdf).
- Zadrozny, Bianca, and Charles Elkan. 2002. "Transforming Classifier Scores into Accurate Multiclass Probability Estimates." Conference Paper. *Proceedings of the ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, August, 694–99.

# Annexes

## Annexe 1

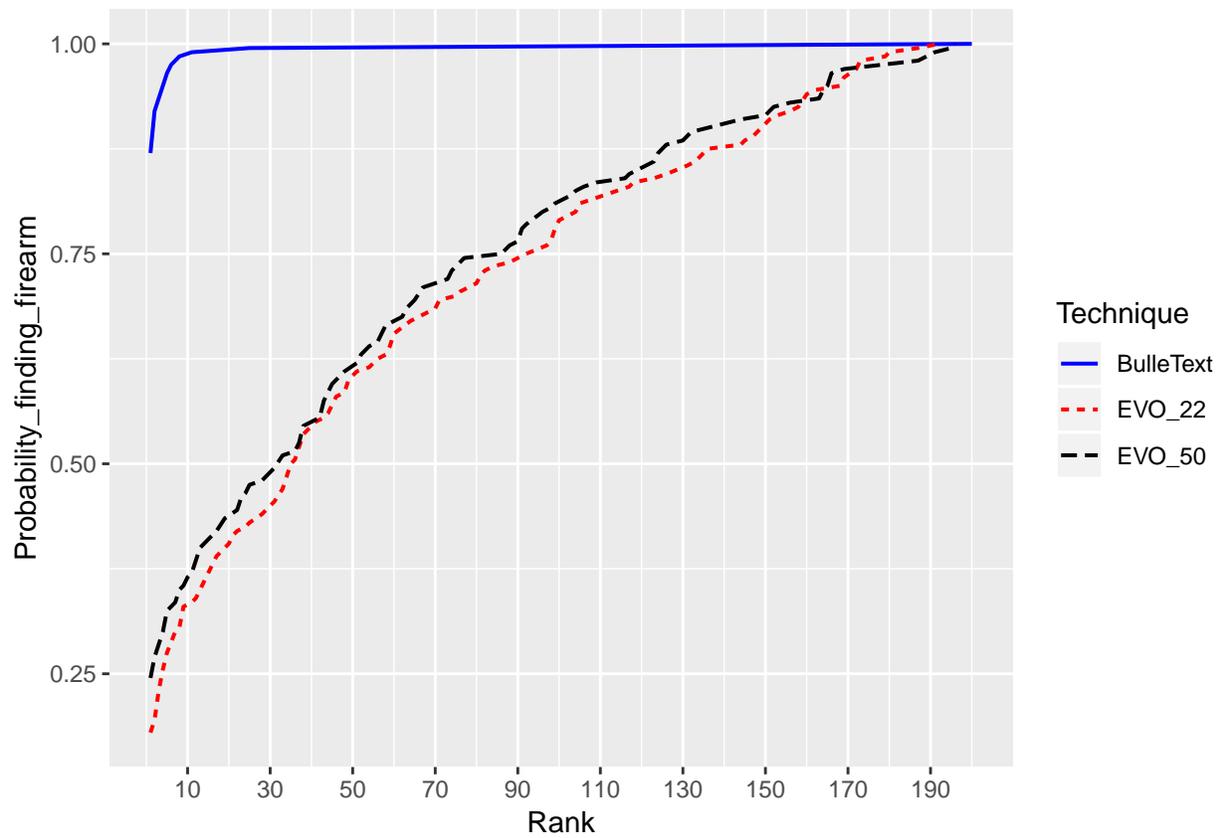


Figure 1: Courbes *CMC* obtenues par les systèmes *EVOFINDER* (deux variantes) et *BulleText* dans le cas *2VS1*. Taille de la base de données : 200

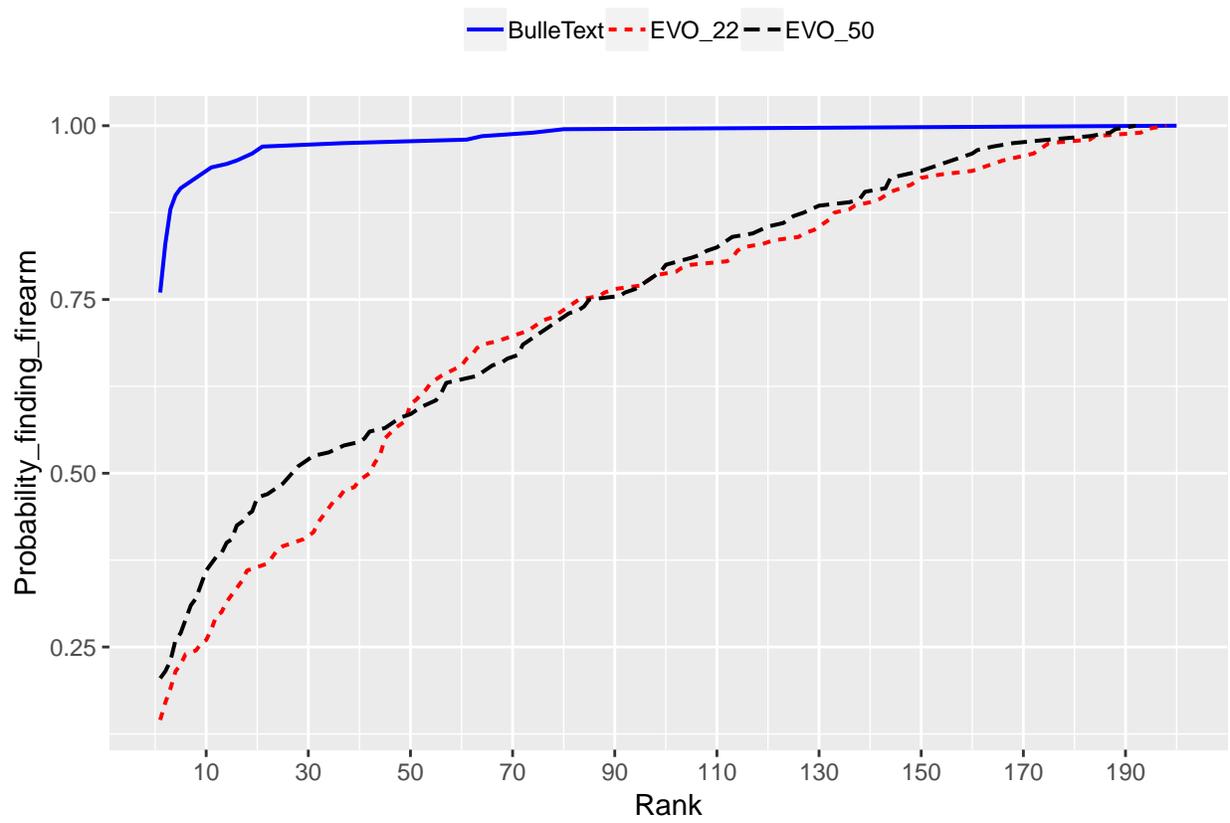


Figure 2: Courbes *CMC* obtenues par les systèmes *EVOFINDER* (deux variantes) et *BulleText* dans le cas *3VS1*. Taille de la base de données : 200

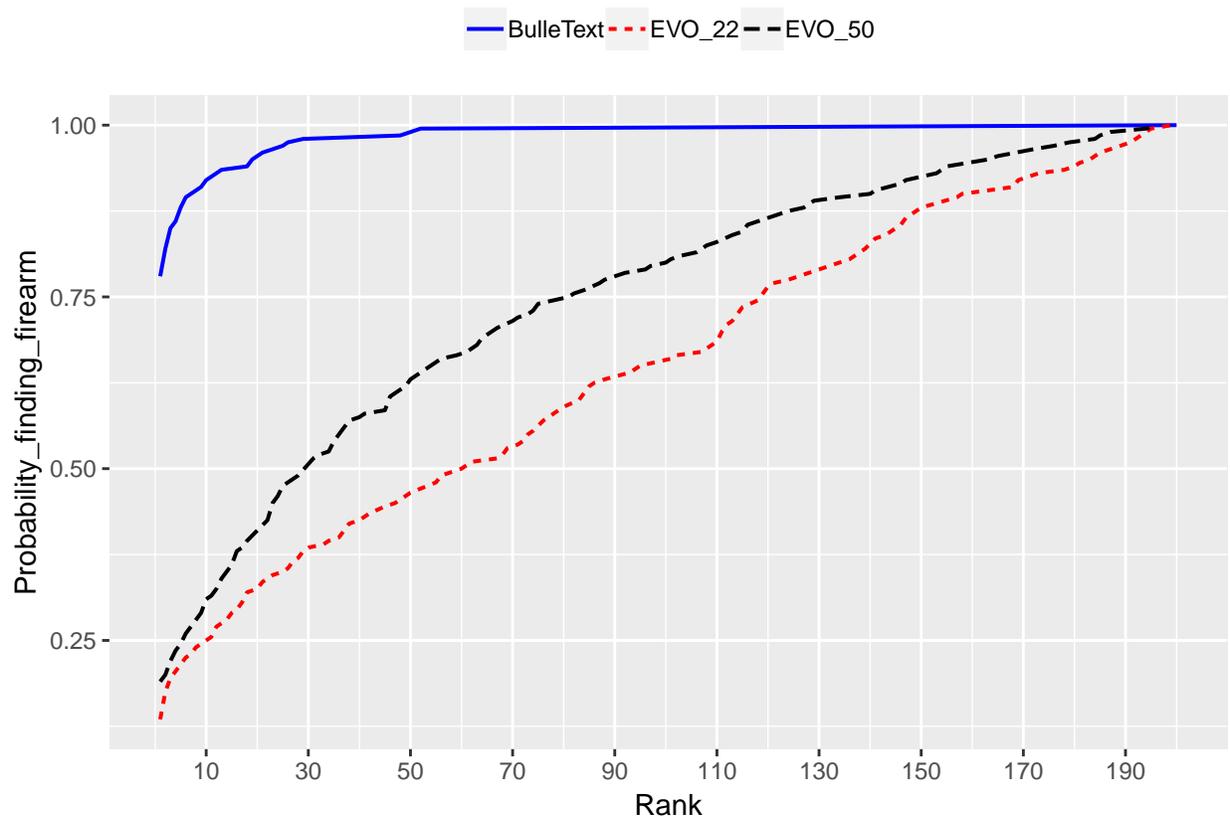


Figure 3: Courbes *CMC* obtenues par les systèmes *EVOFINDER* (deux variantes) et *BulleText* dans le cas  $4VS1$ . Taille de la base de données : 200

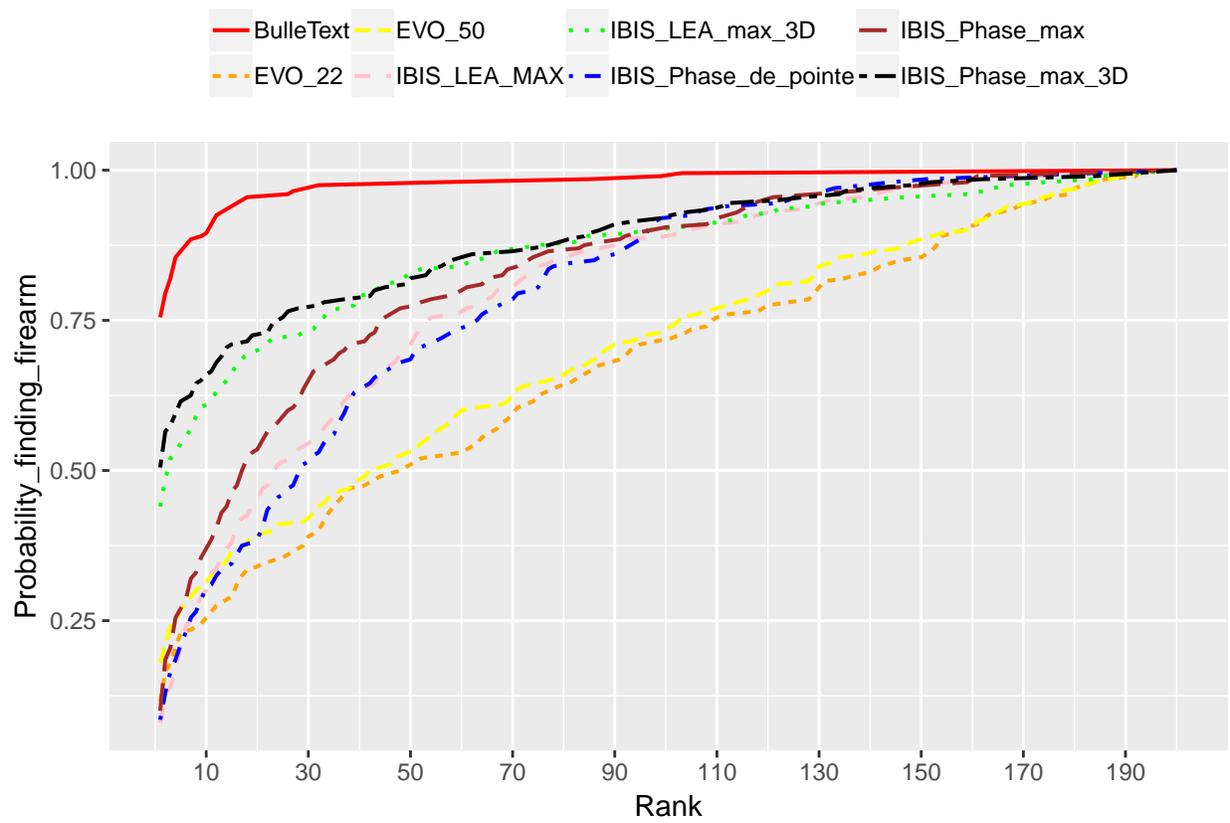


Figure 4: Courbes *CMC* obtenues par les systèmes *EVOFINDER* (deux variantes), *IBIS TRAX3D* (cinq variantes) et *BulleText* dans le cas *5VS1*. Taille de la base de données : 200

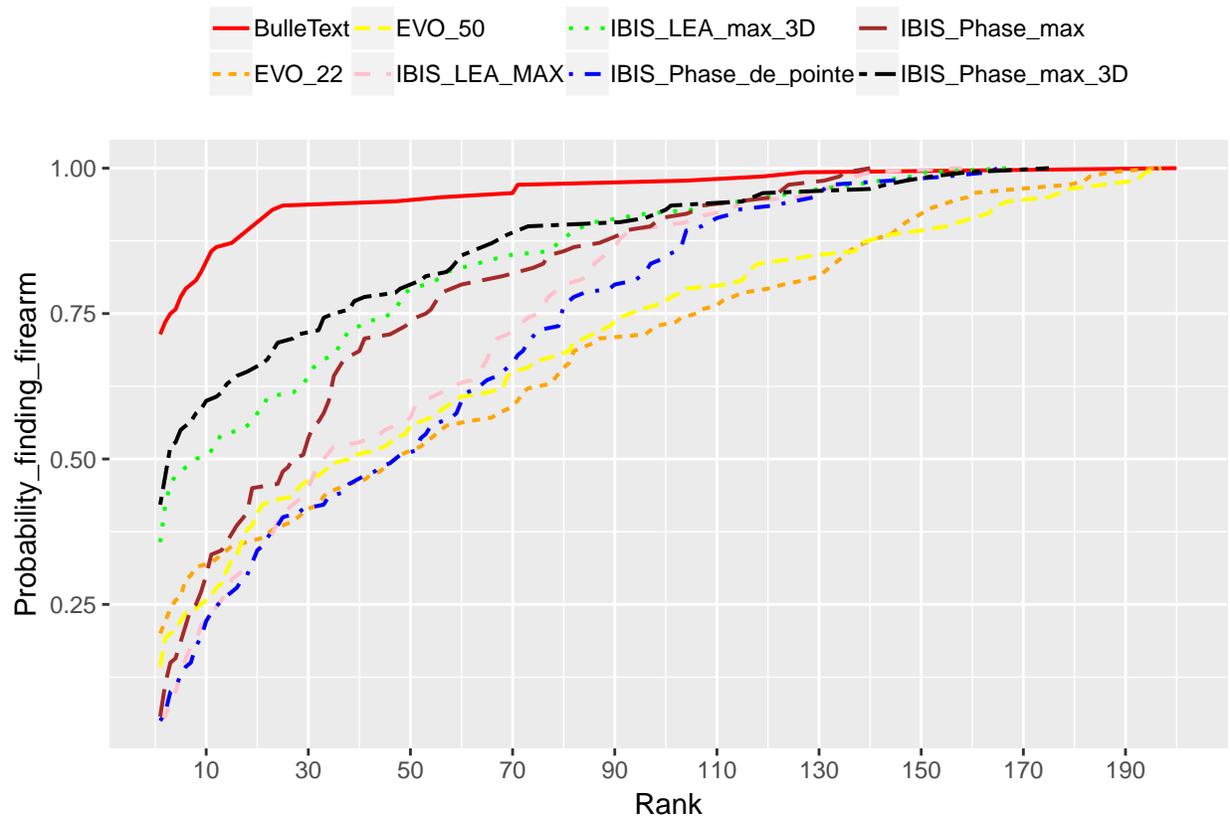


Figure 5: Courbes *CMC* obtenues par les systèmes *EVOFINDER* (deux variantes), *IBIS TRAX3D* (cinq variantes) et *BulleText* dans le cas *6VS1*. Taille de la base de données : 200

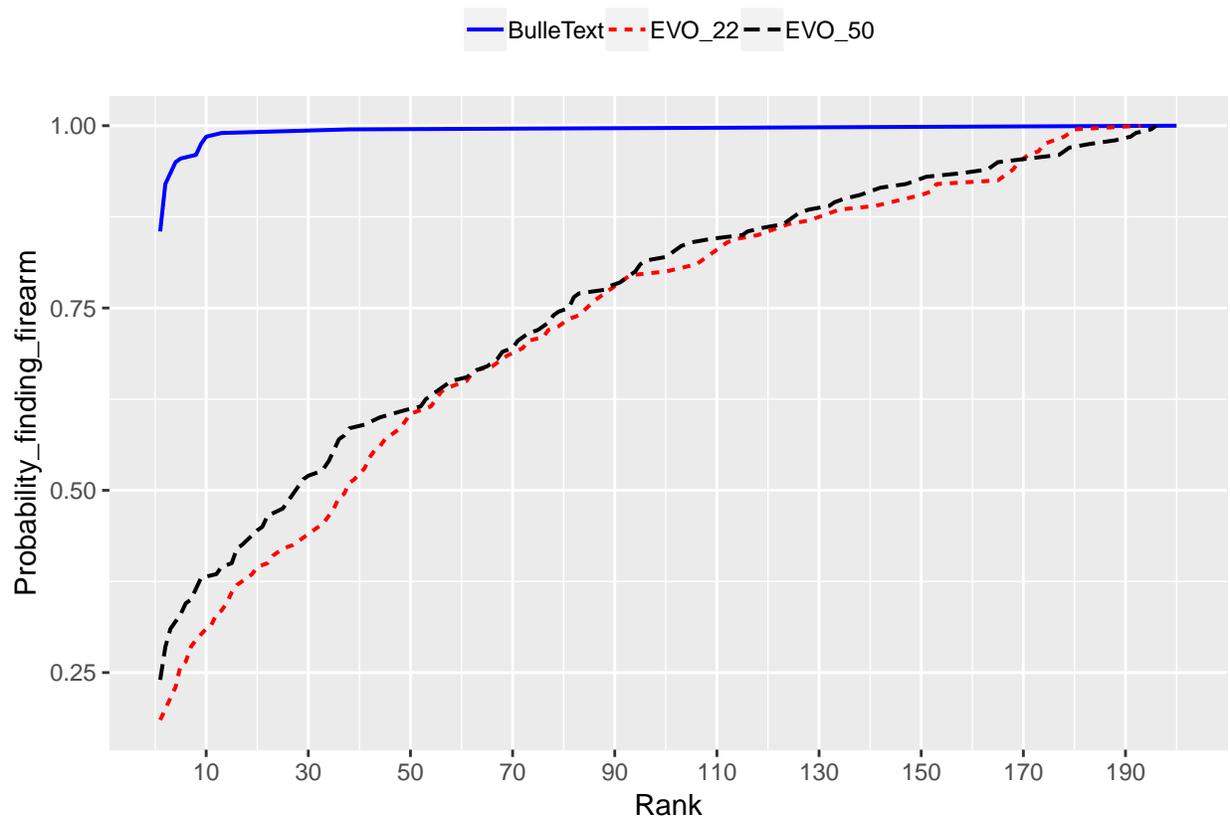


Figure 6: Courbes *CMC* obtenues par les systèmes *EVOFINDER* (deux variantes) et *BulleText* dans le cas *1VS2*. Taille de la base de données : 200

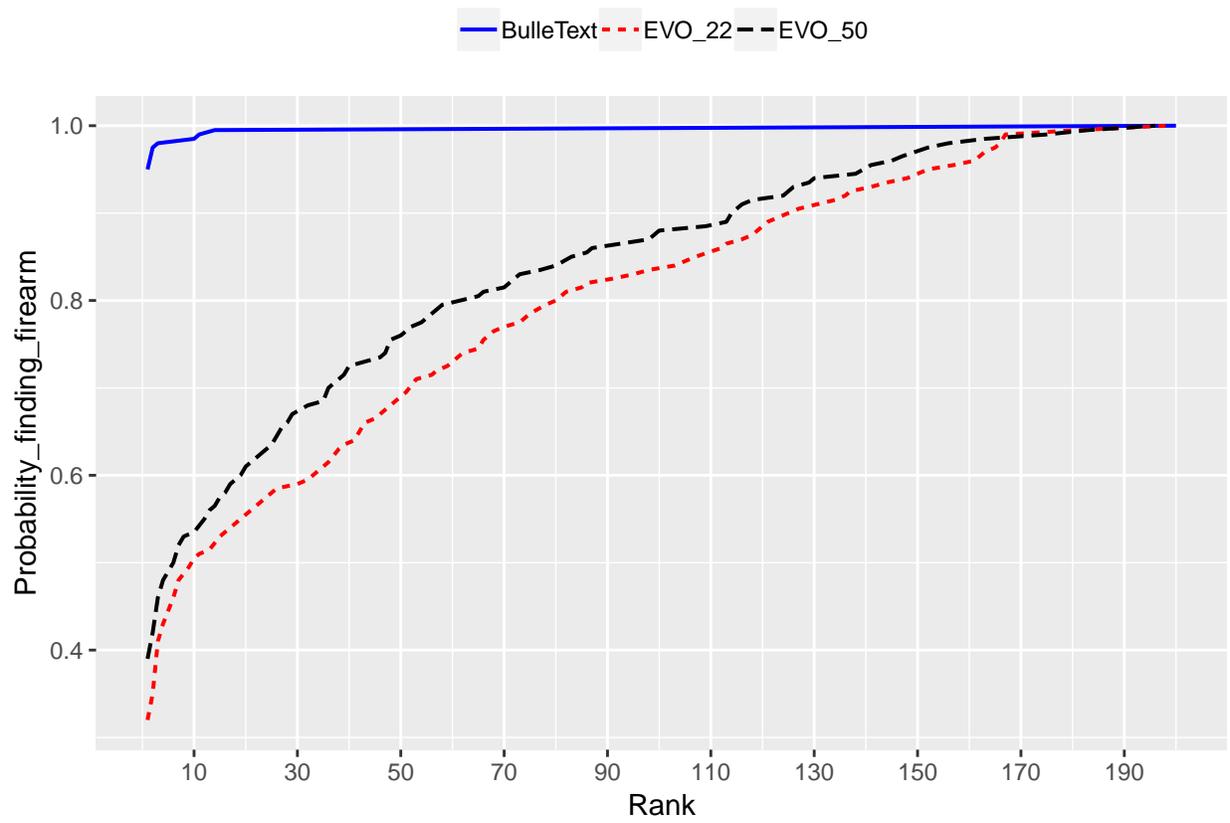


Figure 7: Courbes *CMC* obtenues par les systèmes *EVOFINDER* (deux variantes) et *BulleText* dans le cas *3VS2*. Taille de la base de données : 200

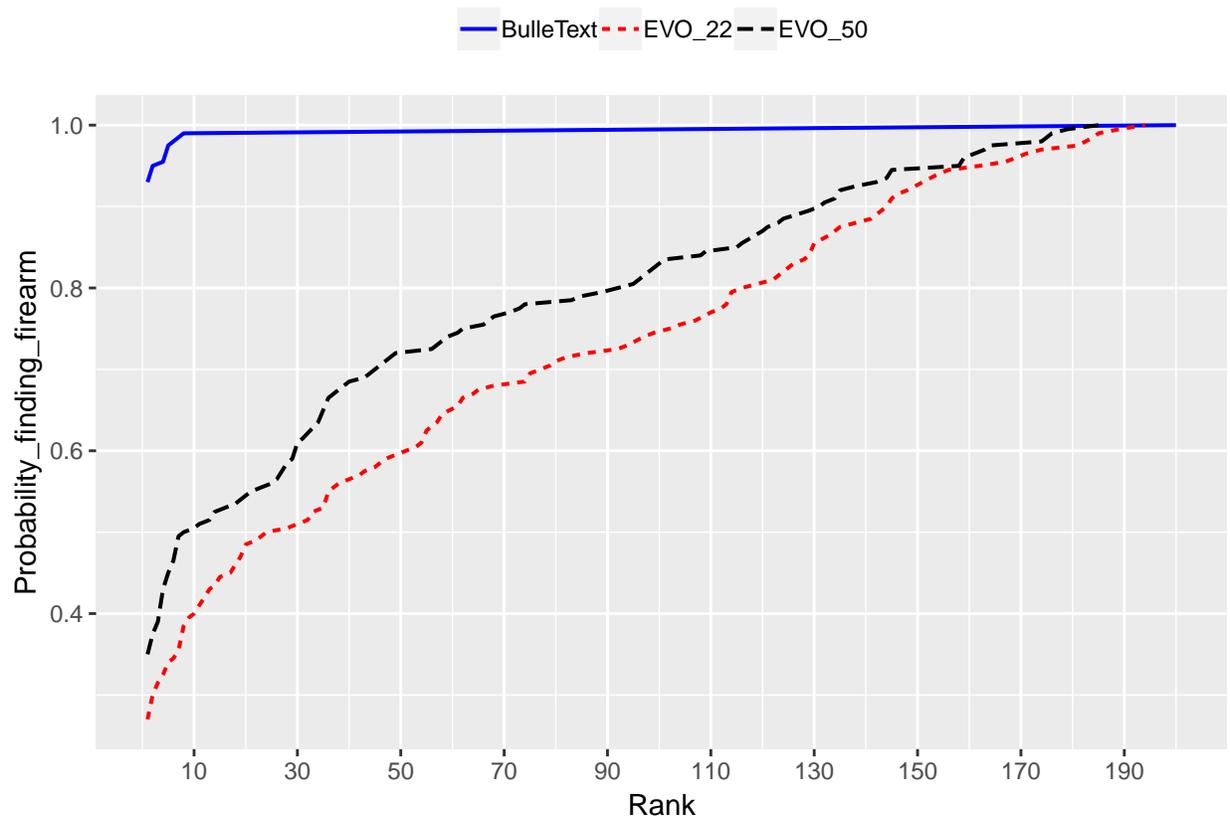


Figure 8: Courbes *CMC* obtenues par les systèmes *EVOFINDER* (deux variantes) et *BulleText* dans le cas  $4VS2$ . Taille de la base de données : 200

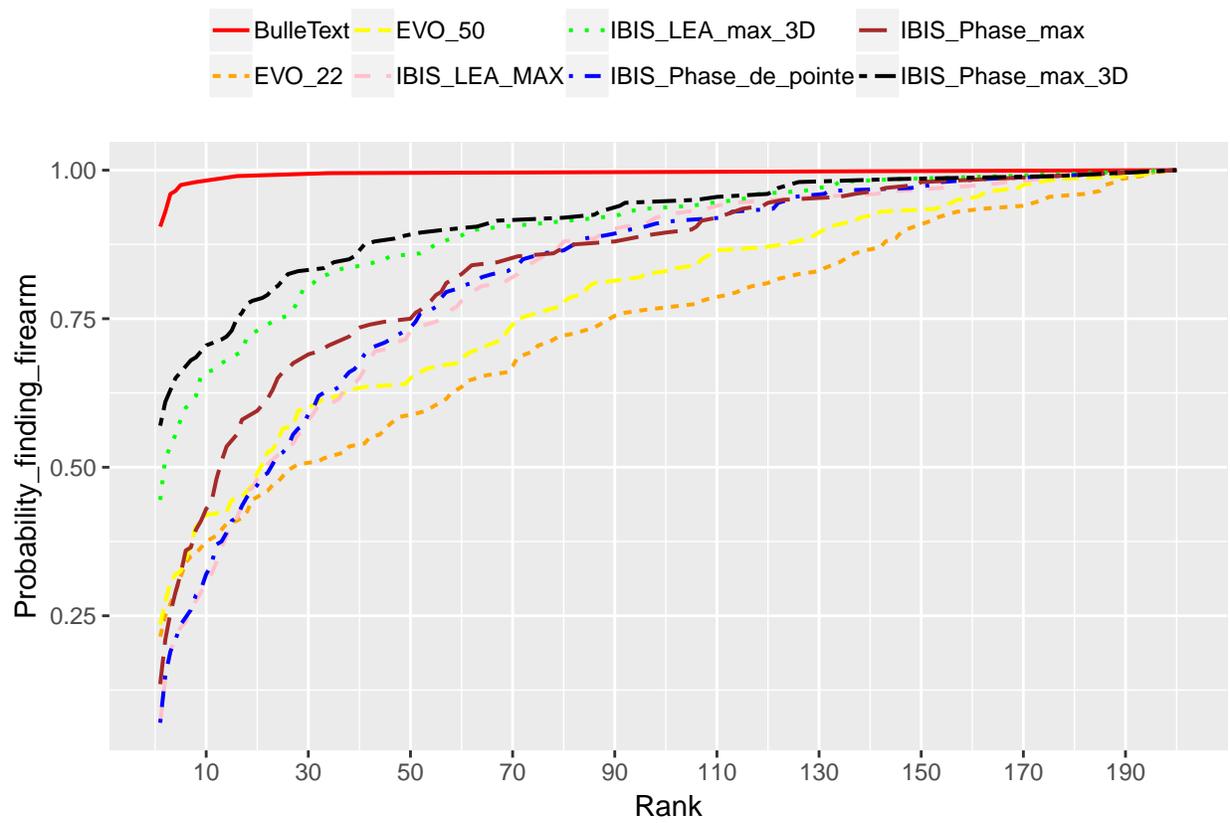


Figure 9: Courbes *CMC* obtenues par les systèmes *EVOFINDER* (deux variantes), *IBIS TRAX3D* (cinq variantes) et *BulleText* dans le cas *5VS2*. Taille de la base de données : 200

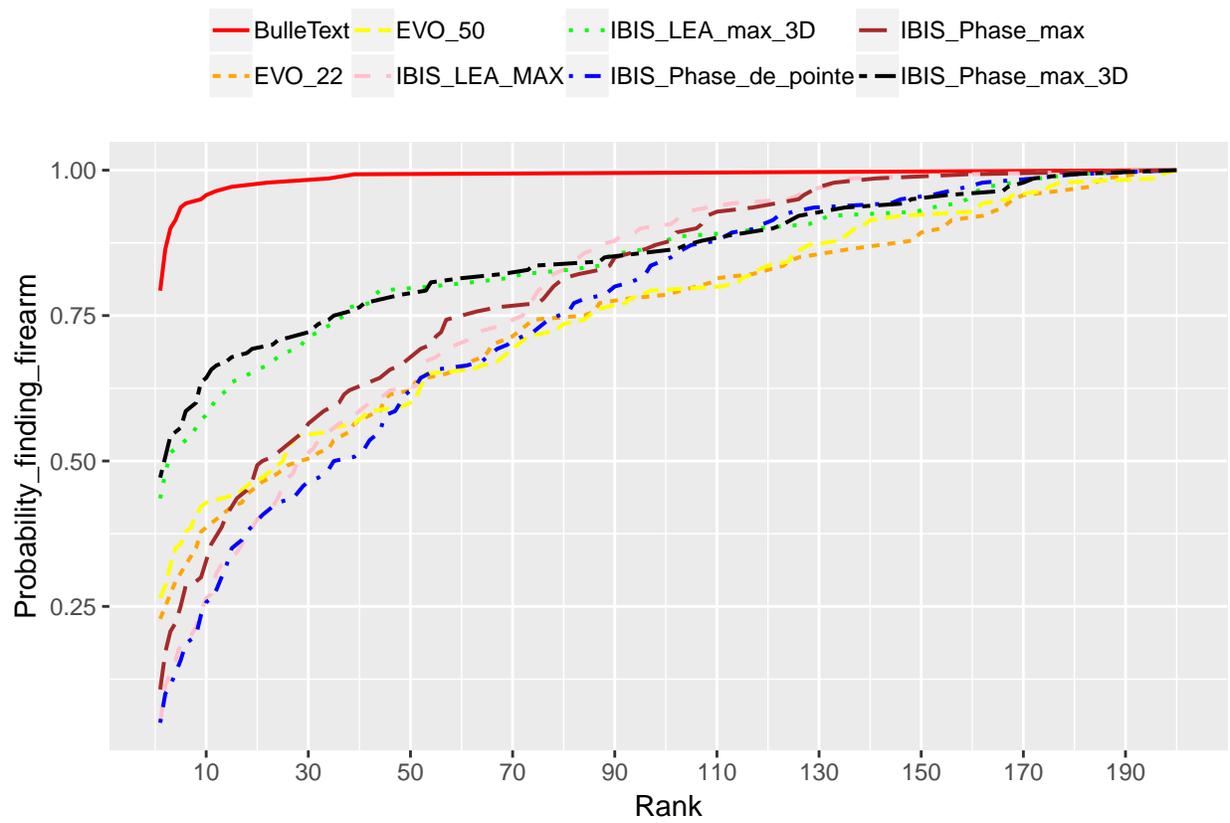


Figure 10: Courbes *CMC* obtenues par les systèmes *EVOFINDER* (deux variantes), *IBIS TRAX3D* (cinq variantes) et *BulleText* dans le cas *6VS2*. Taille de la base de données : 200

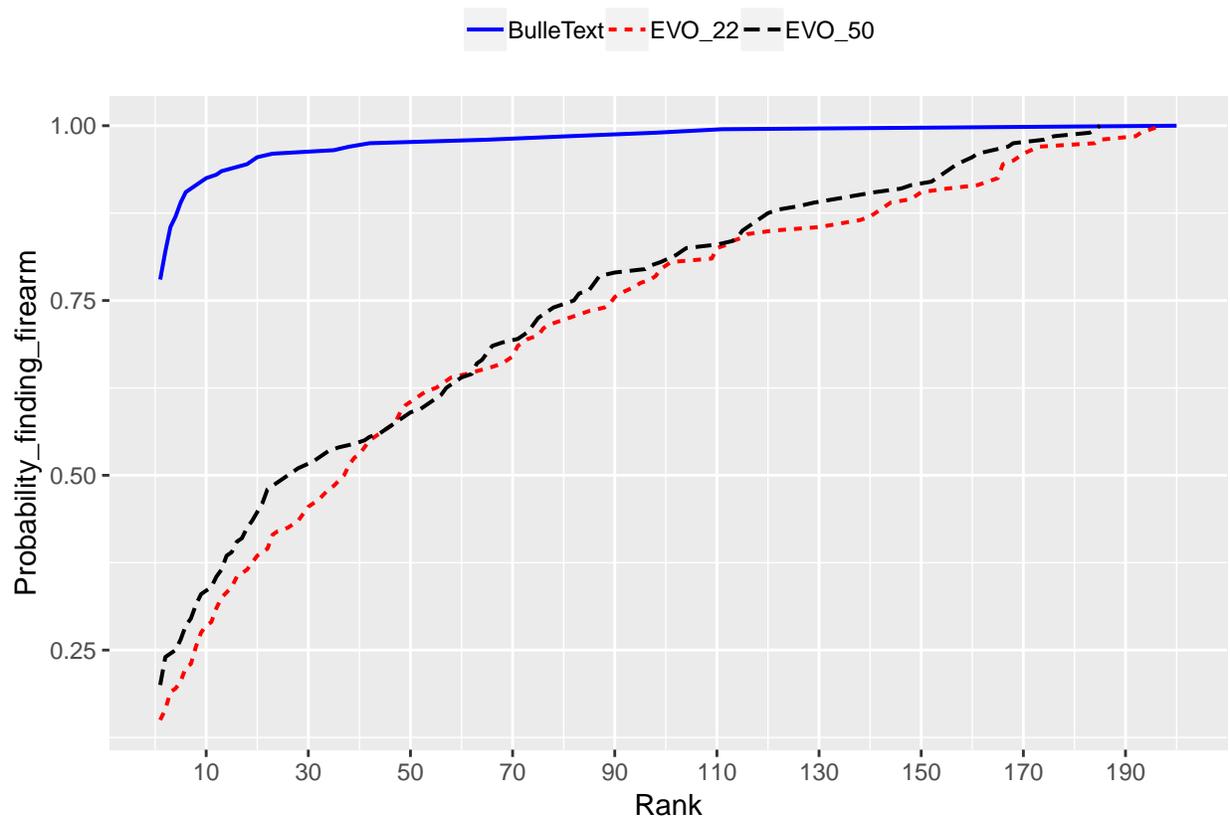


Figure 11: Courbes *CMC* obtenues par les systèmes *EVOFINDER* (deux variantes) et *BulleText* dans le cas *1VS3*. Taille de la base de données : 200

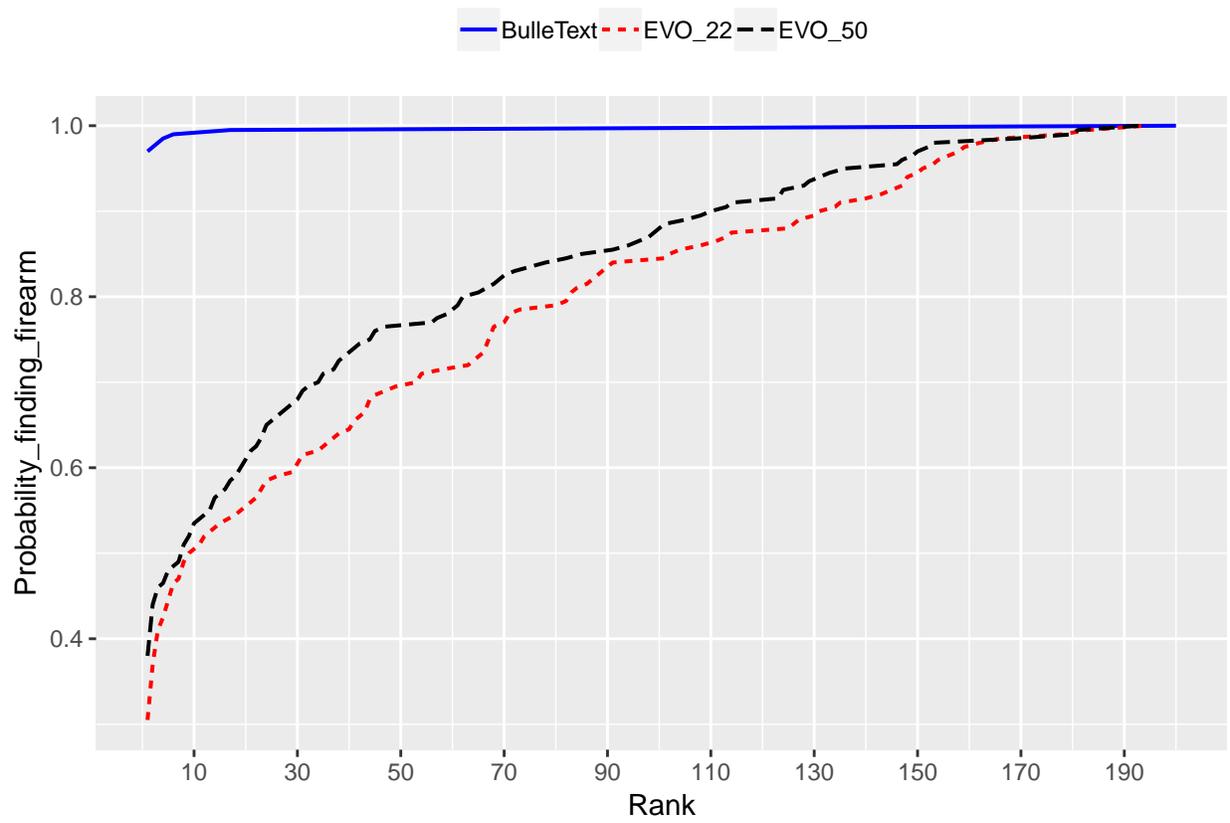


Figure 12: Courbes *CMC* obtenues par les systèmes *EVOFINDER* (deux variantes) et *BulleText* dans le cas *2VS3*. Taille de la base de données : 200

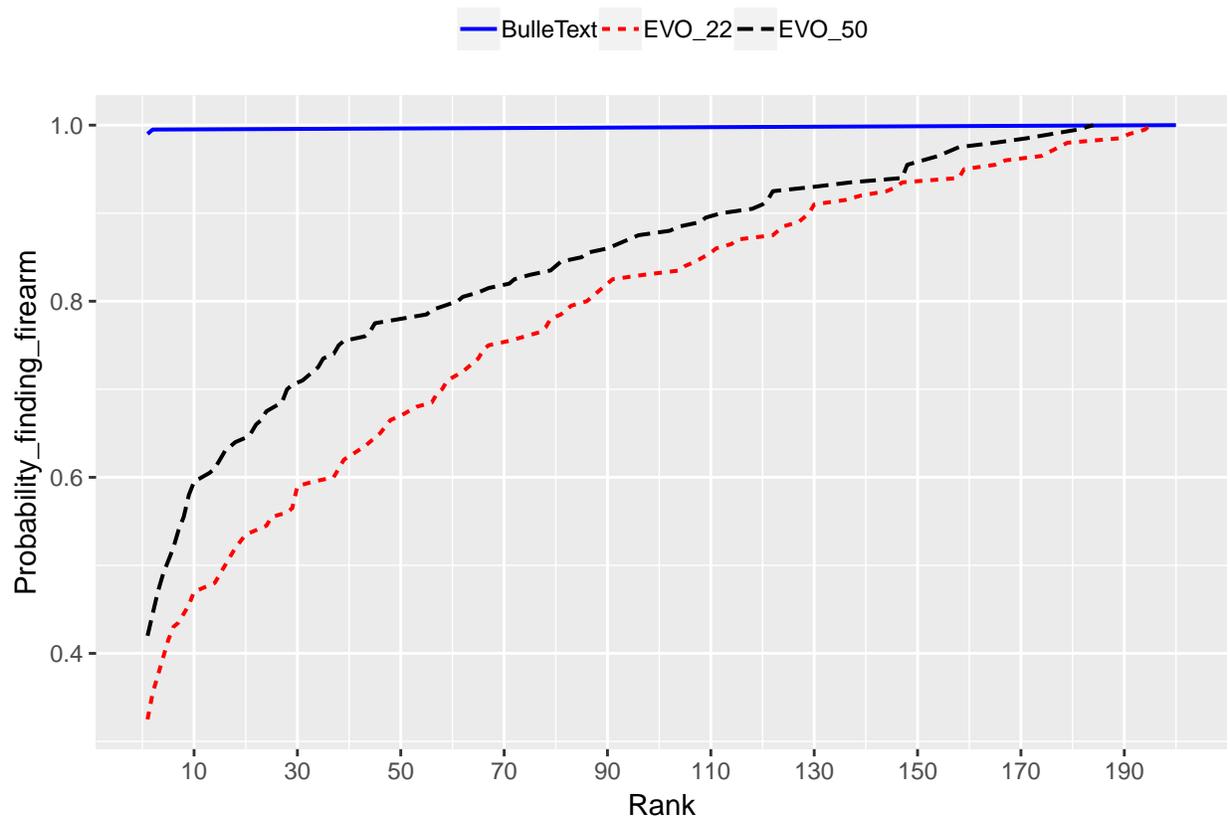


Figure 13: Courbes *CMC* obtenues par les systèmes *EVOFINDER* (deux variantes) et *BulleText* dans le cas  $4VS3$ . Taille de la base de données : 200

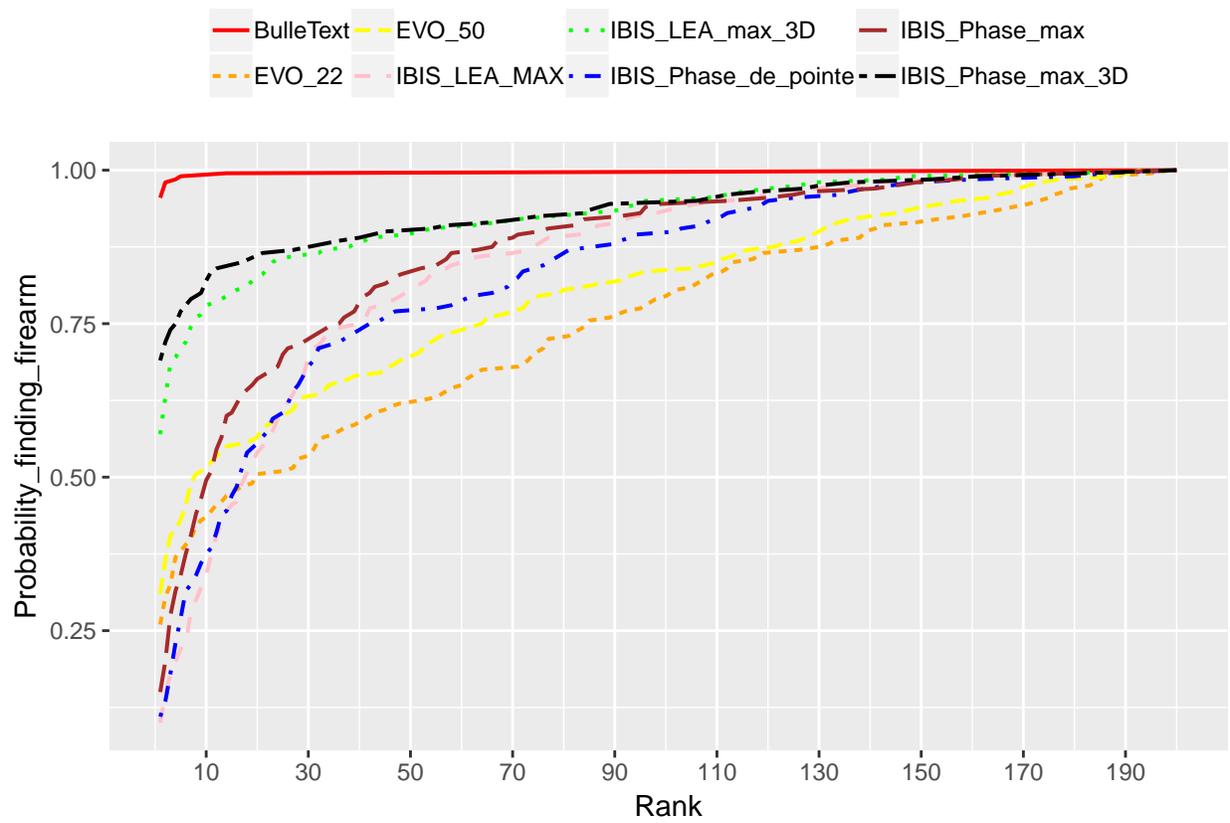


Figure 14: Courbes *CMC* obtenues par les systèmes *EVOFINDER* (deux variantes), *IBIS TRAX3D* (cinq variantes) et *BulleText* dans le cas *5VS3*. Taille de la base de données : 200

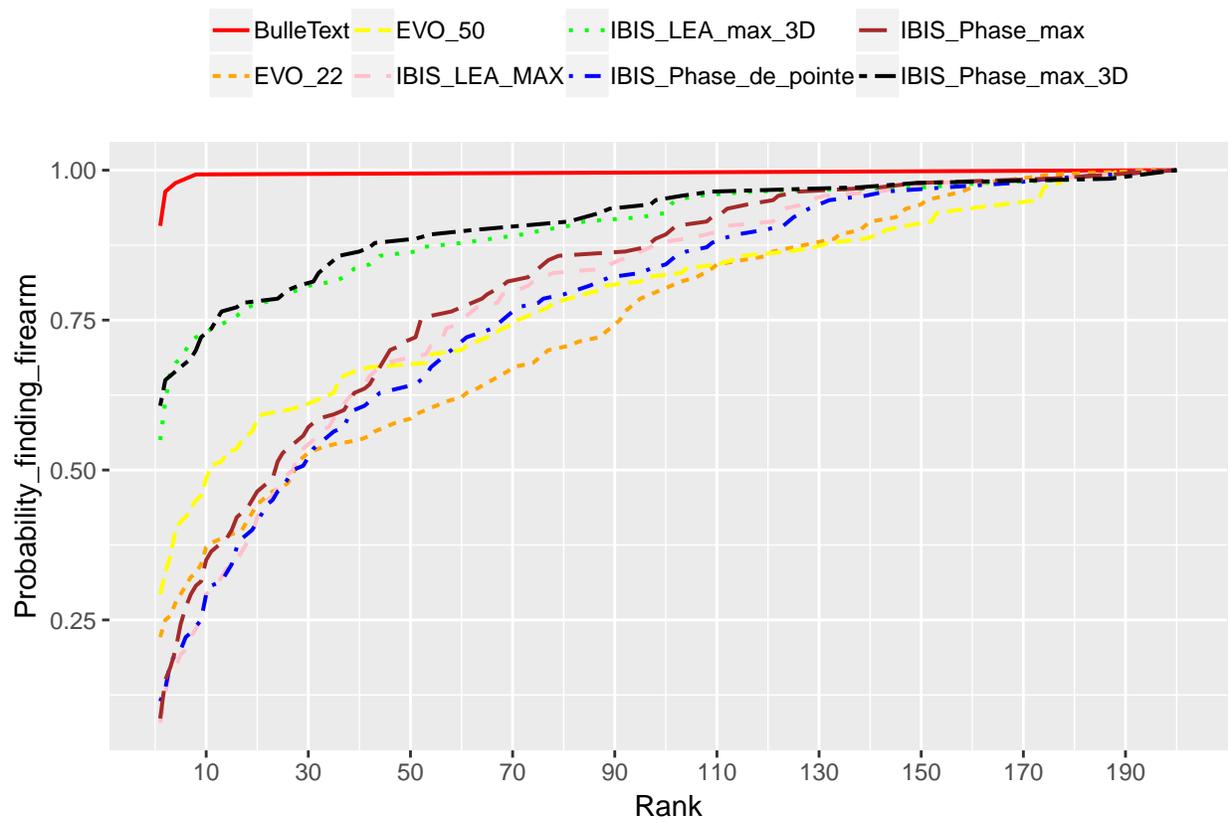


Figure 15: Courbes *CMC* obtenues par les systèmes *EVOFINDER* (deux variantes), *IBIS TRAX3D* (cinq variantes) et *BulleText* dans le cas *6VS3*. Taille de la base de données : 200

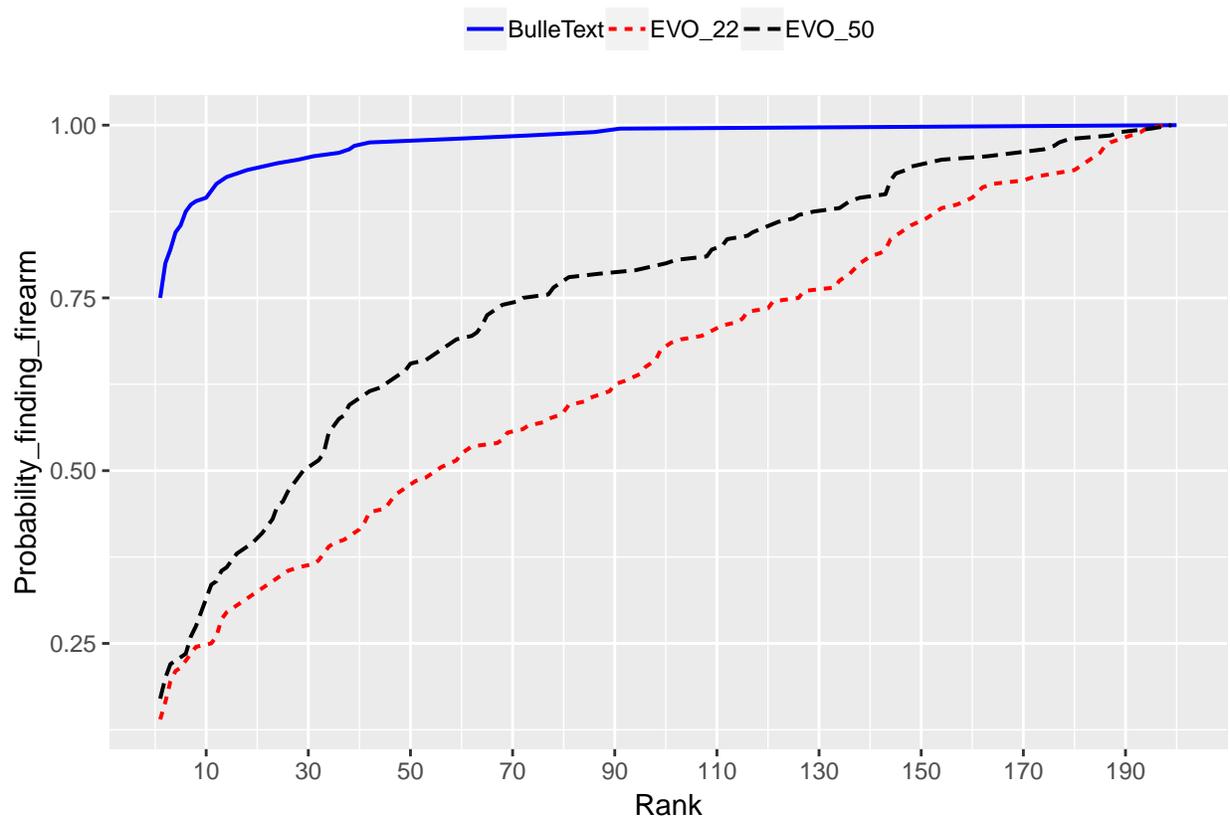


Figure 16: Courbes *CMC* obtenues par les systèmes *EVOFINDER* (deux variantes) et *BulleText* dans le cas *1VS4*. Taille de la base de données : 200

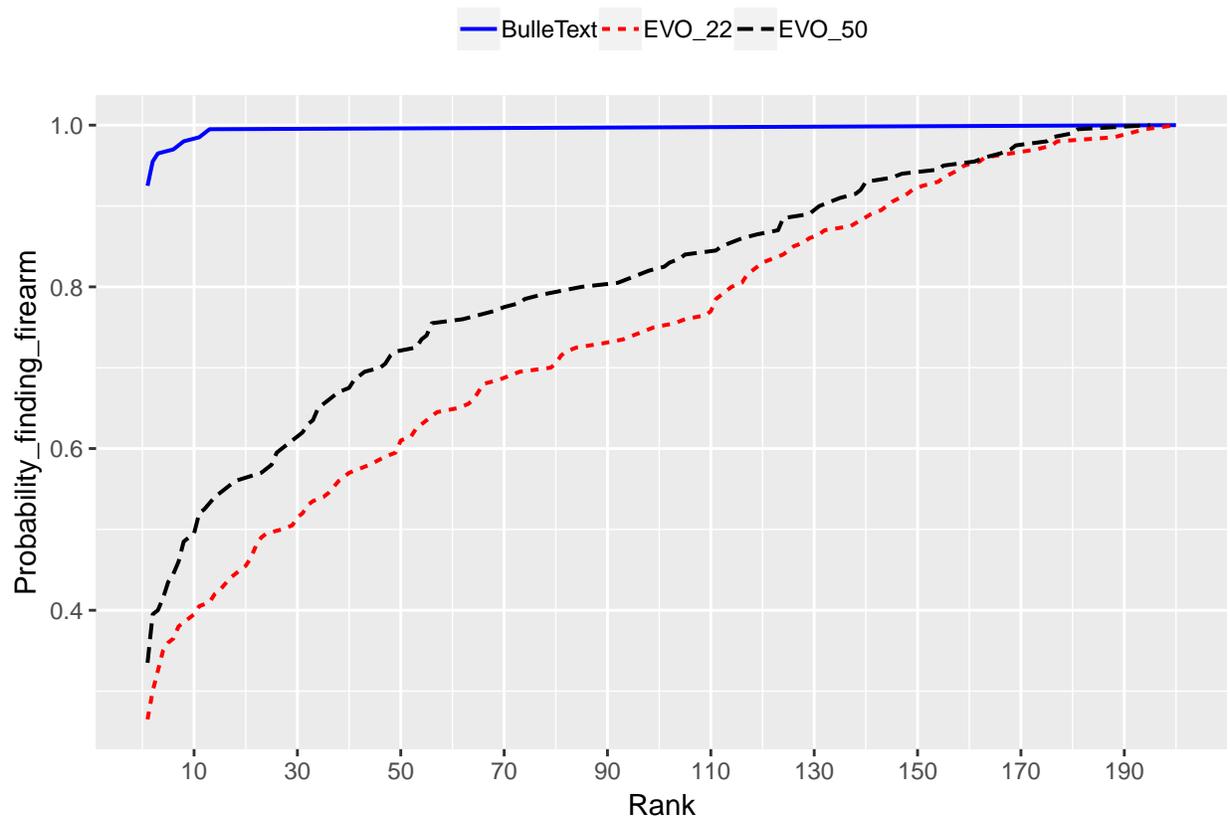


Figure 17: Courbes *CMC* obtenues par les systèmes *EVOFINDER* (deux variantes) et *BulleText* dans le cas  $2VS_4$ . Taille de la base de données : 200

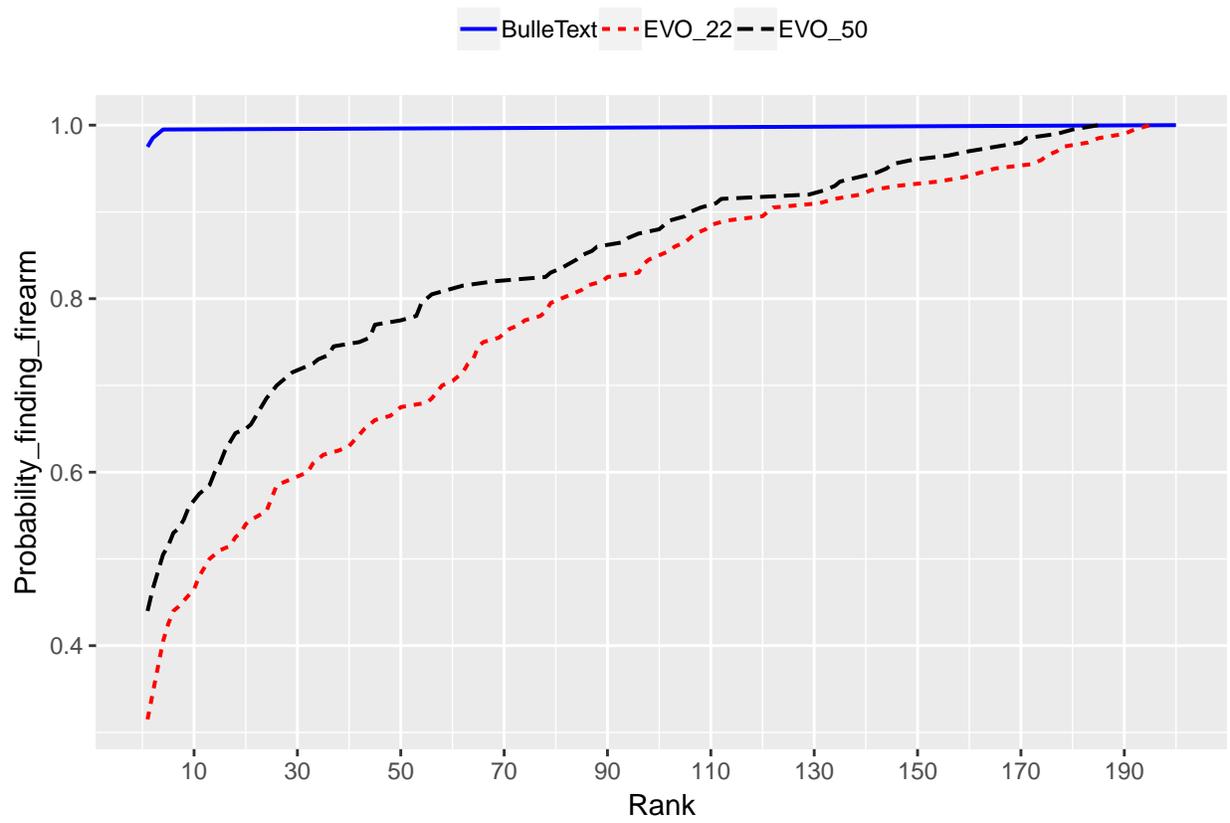


Figure 18: Courbes *CMC* obtenues par les systèmes *EVOFINDER* (deux variantes) et *BulleText* dans le cas  $3VS_4$ . Taille de la base de données : 200

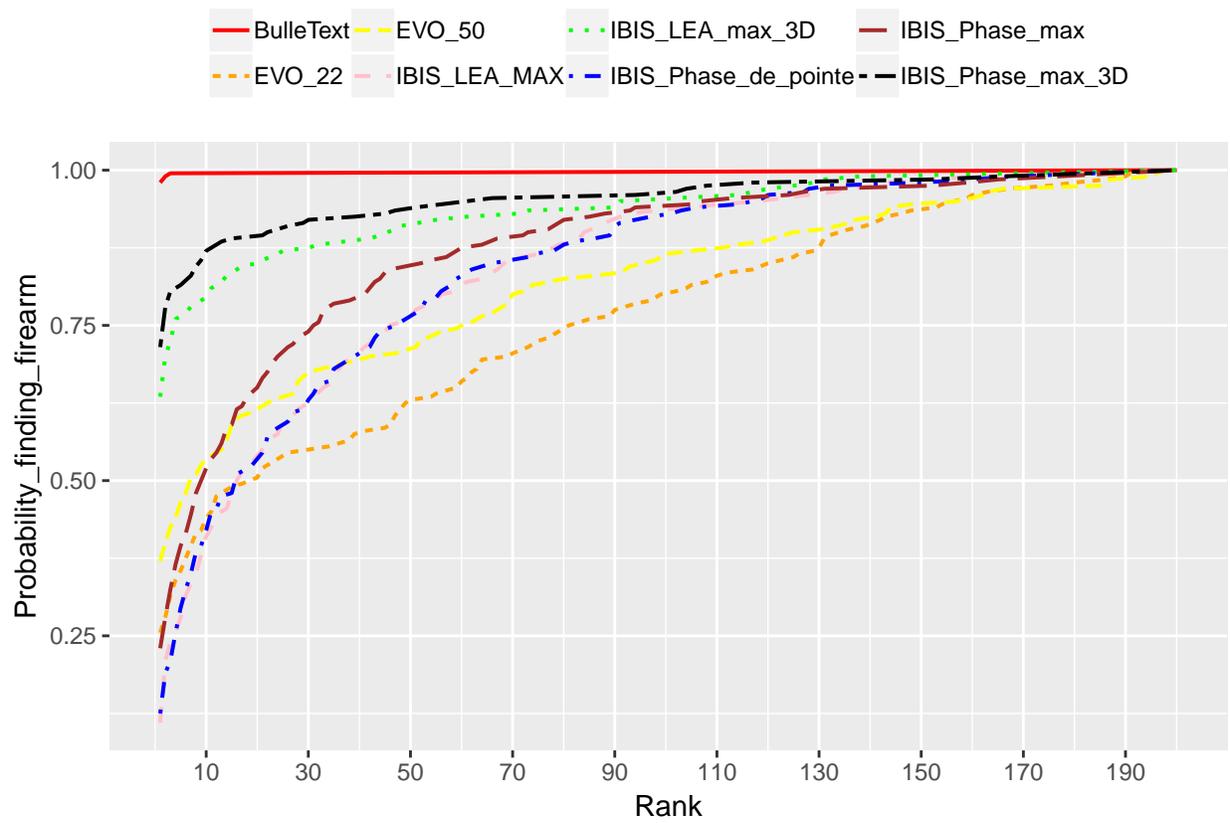


Figure 19: Courbes *CMC* obtenues par les systèmes *EVOFINDER* (deux variantes), *IBIS TRAX3D* (cinq variantes) et *BulleText* dans le cas *5VS4*. Taille de la base de données : 200

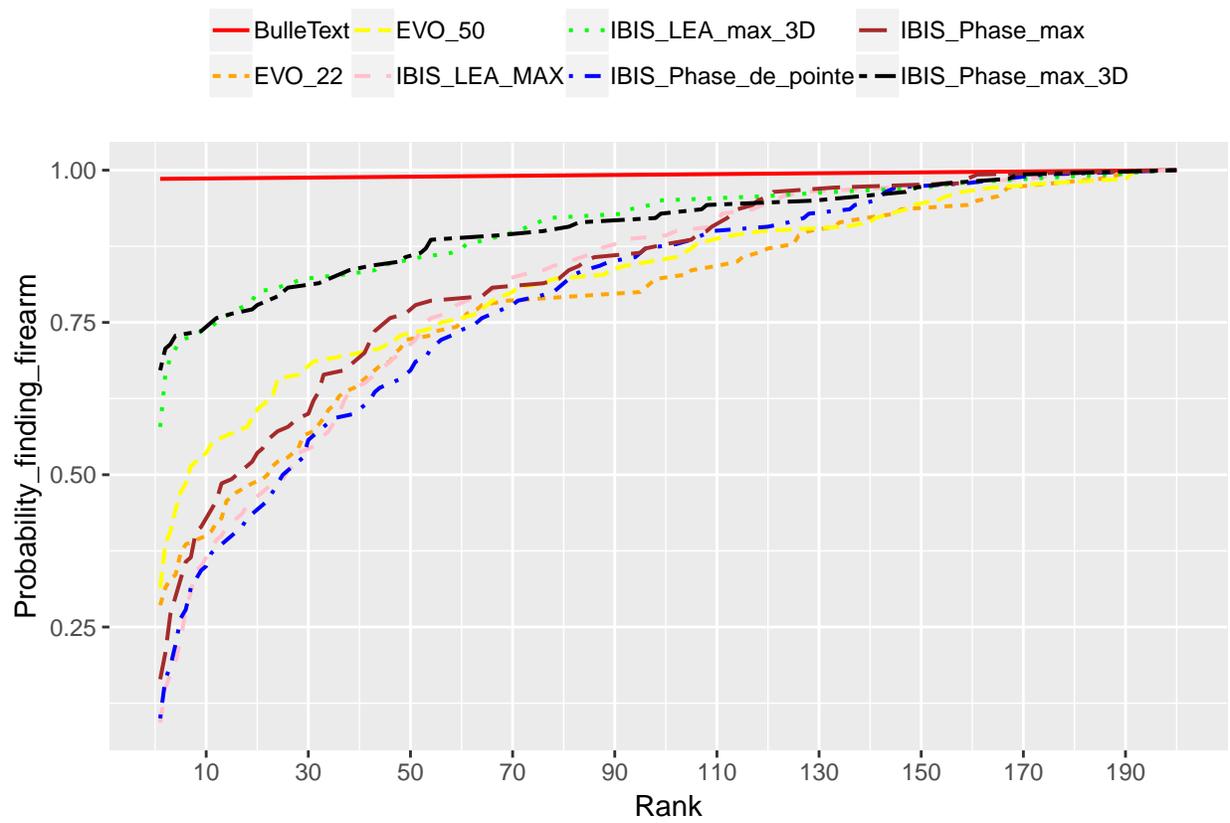


Figure 20: Courbes *CMC* obtenues par les systèmes *EVOFINDER* (deux variantes), *IBIS TRAX3D* (cinq variantes) et *BulleText* dans le cas *6VS4*. Taille de la base de données : 200

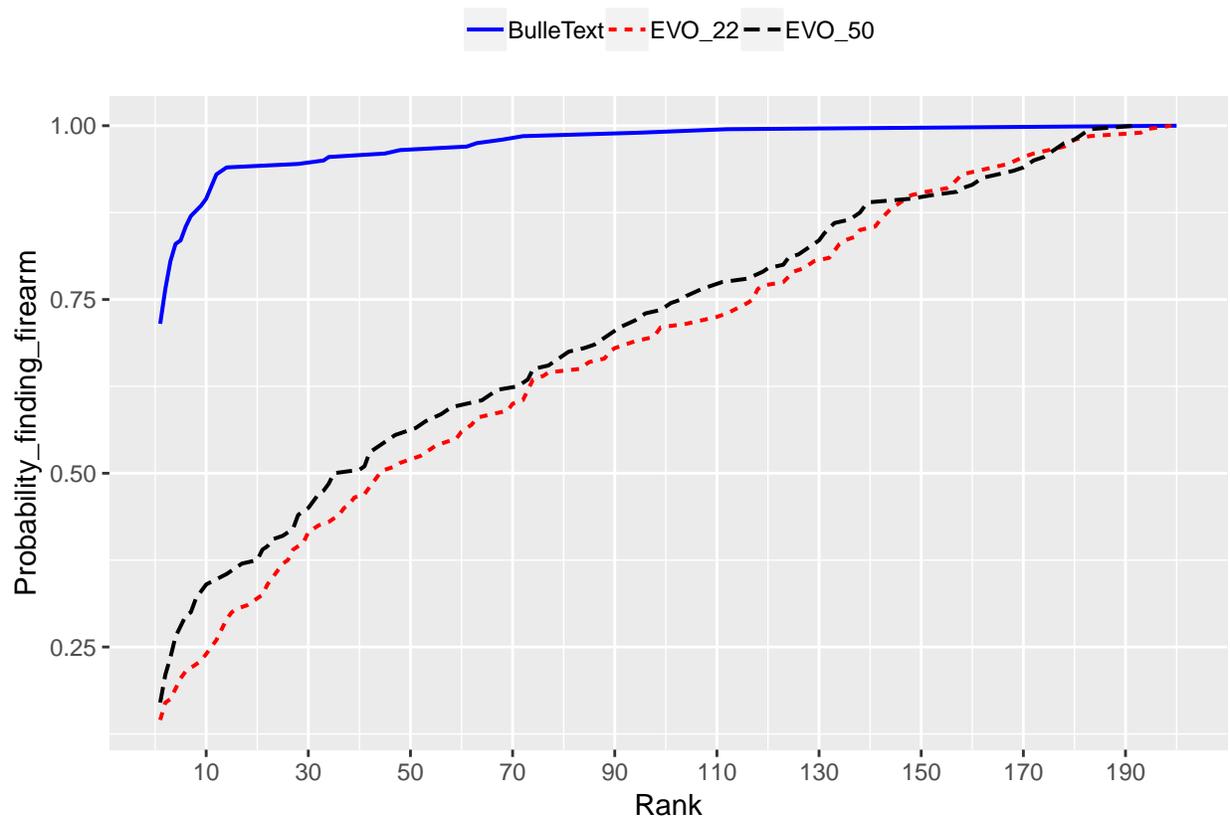


Figure 21: Courbes *CMC* obtenues par les systèmes *EVOFINDER* (deux variantes) et *BulleText* dans le cas *1VS5*. Taille de la base de données : 200

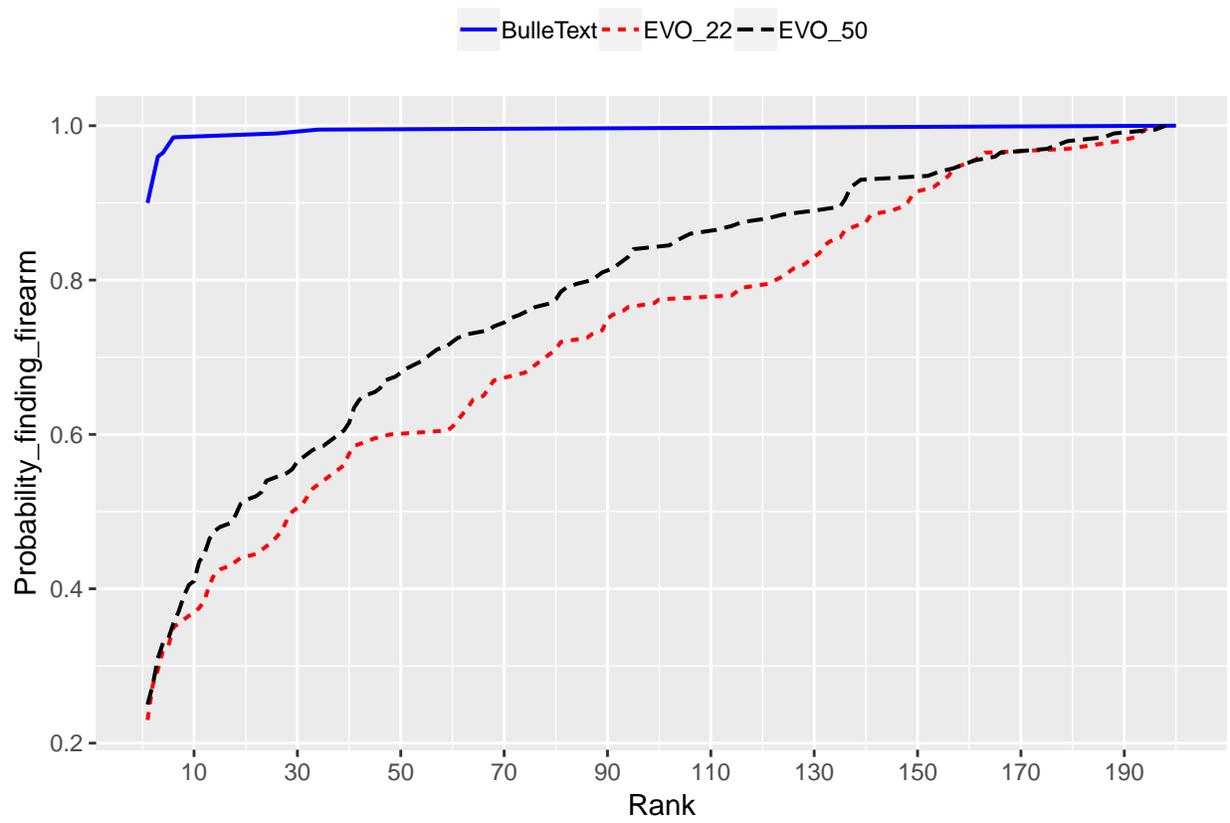


Figure 22: Courbes *CMC* obtenues par les systèmes *EVOFINDER* (deux variantes) et *BulleText* dans le cas *2VS5*. Taille de la base de données : 200

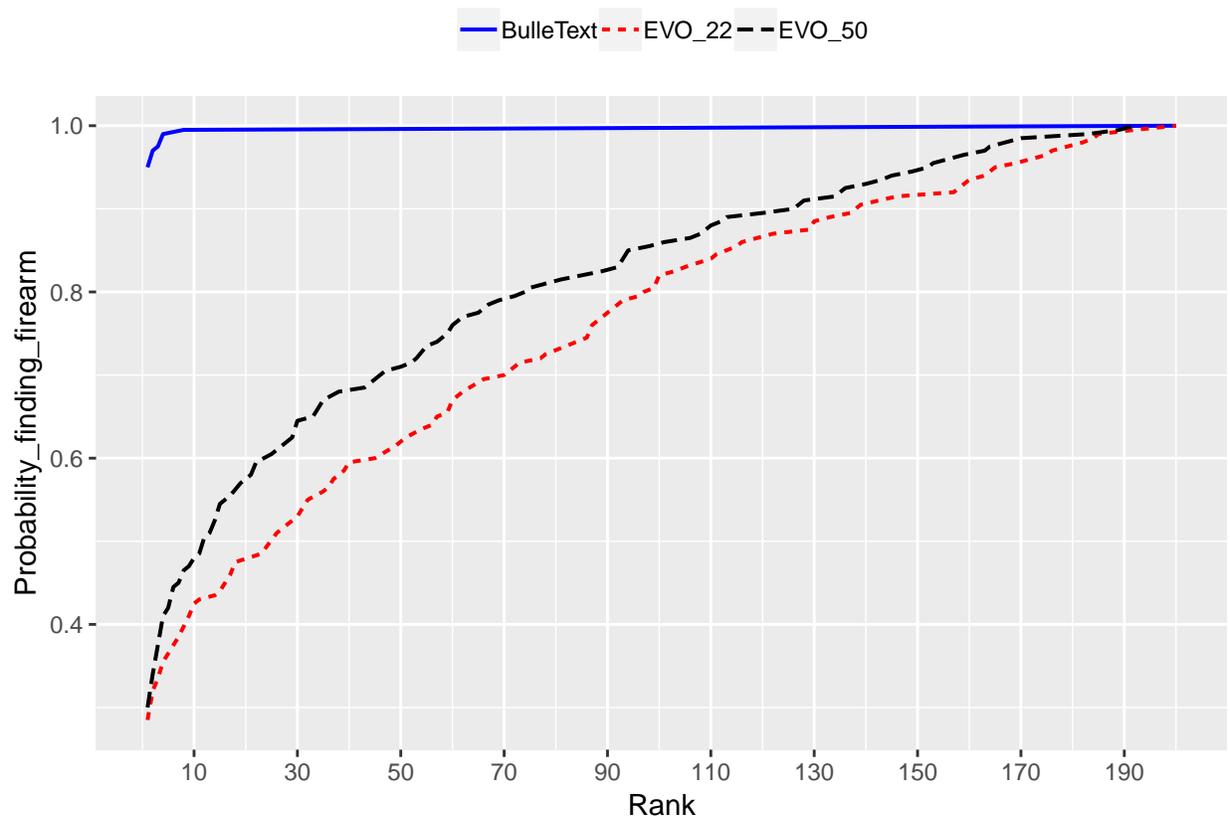


Figure 23: Courbes *CMC* obtenues par les systèmes *EVOFINDER* (deux variantes) et *BulleText* dans le cas *3VS5*. Taille de la base de données : 200

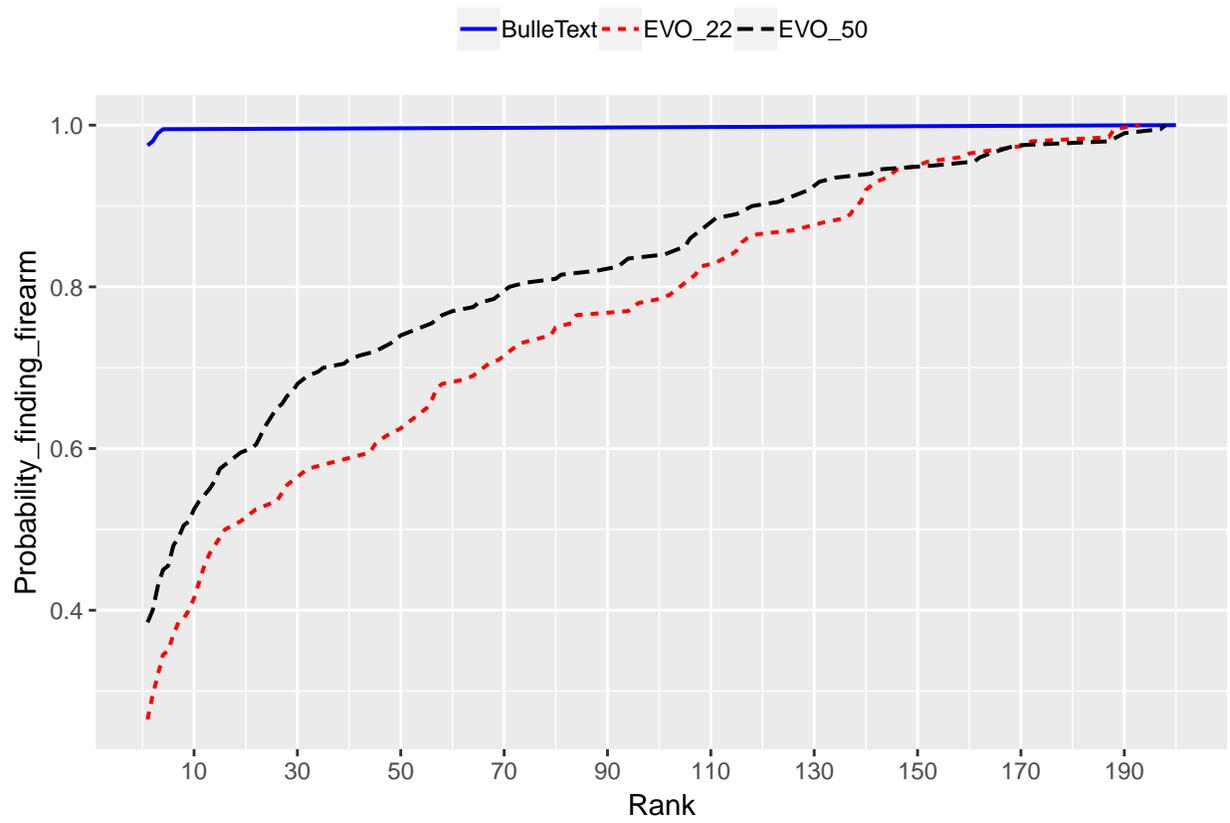


Figure 24: Courbes *CMC* obtenues par les systèmes *EVOFINDER* (deux variantes) et *BulleText* dans le cas  $4VS5$ . Taille de la base de données : 200

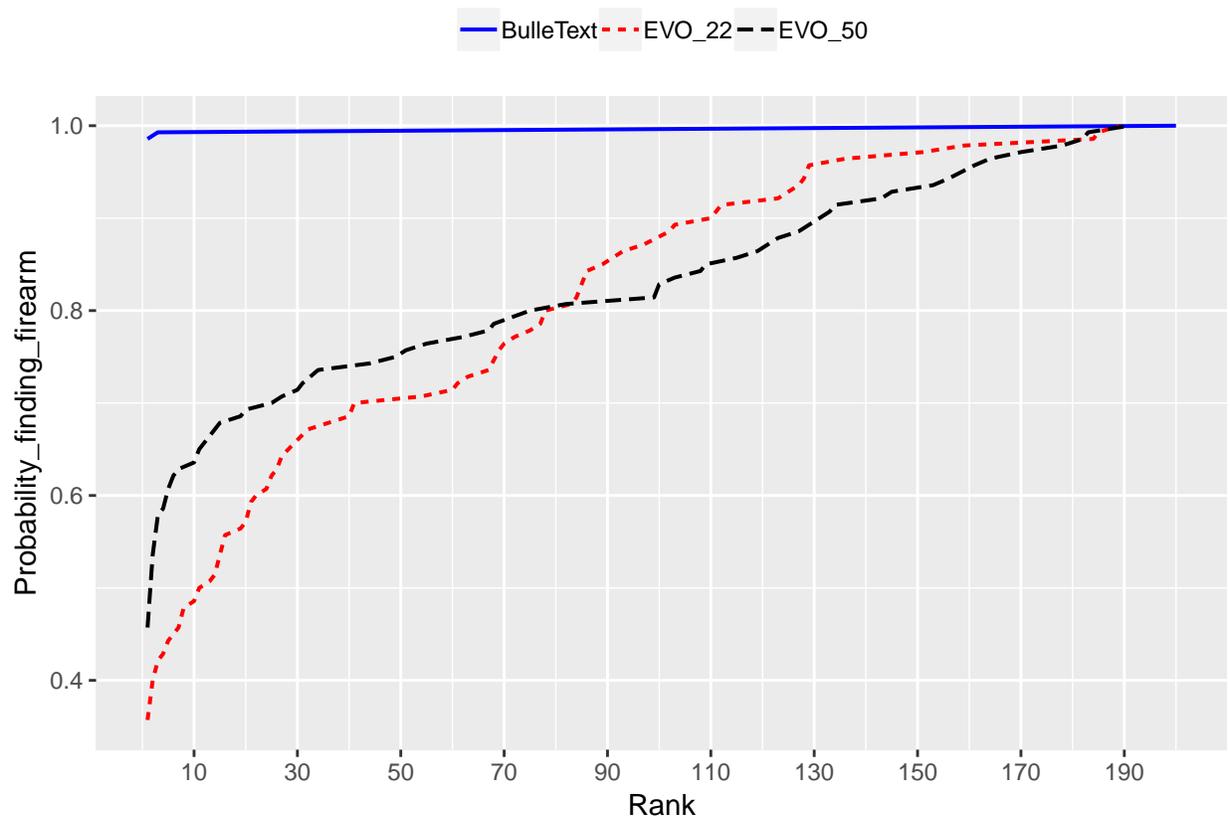


Figure 25: Courbes *CMC* obtenues par les systèmes *EVOFINDER* (deux variantes) et *BulleText* dans le cas *6VS5*. Taille de la base de données : 200

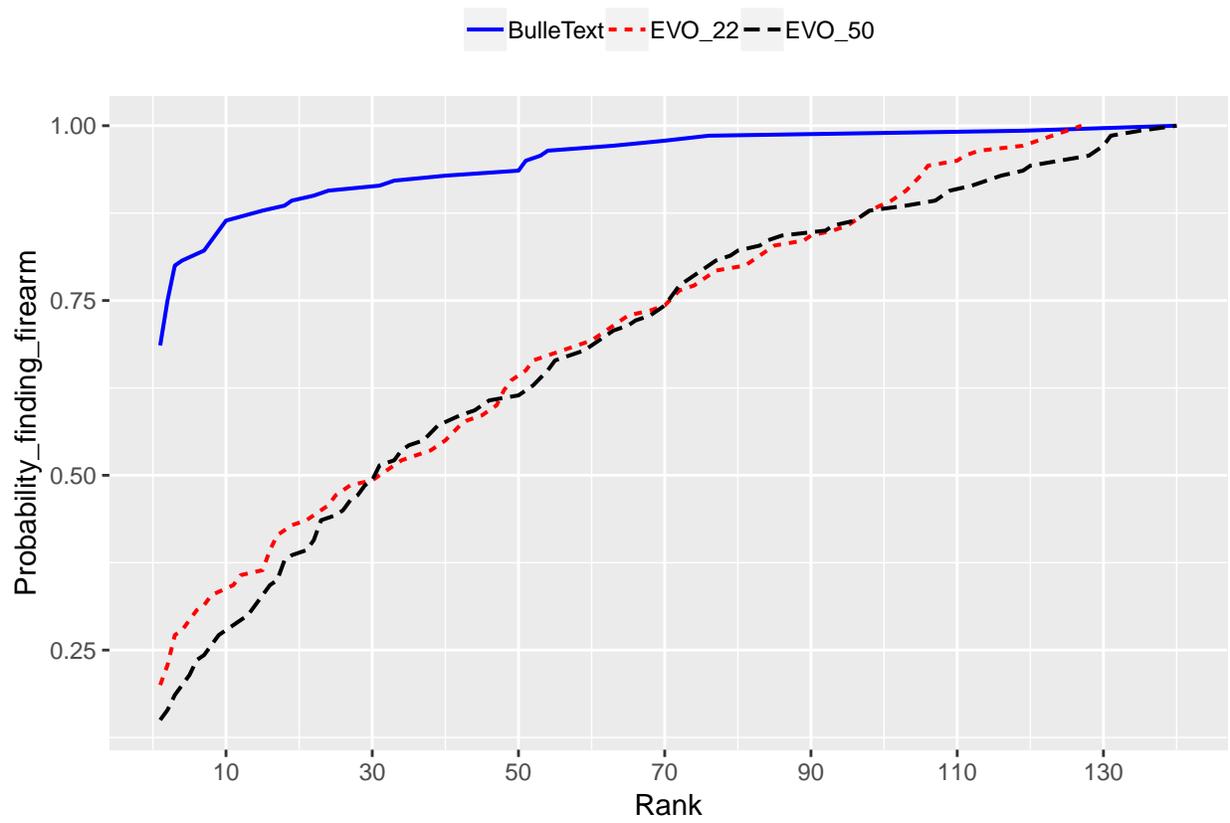


Figure 26: Courbes CMC obtenues par les systèmes *EVOFINDER* (deux variantes) et *BulleText* dans le cas *1VS6*. Taille de la base de données : 140

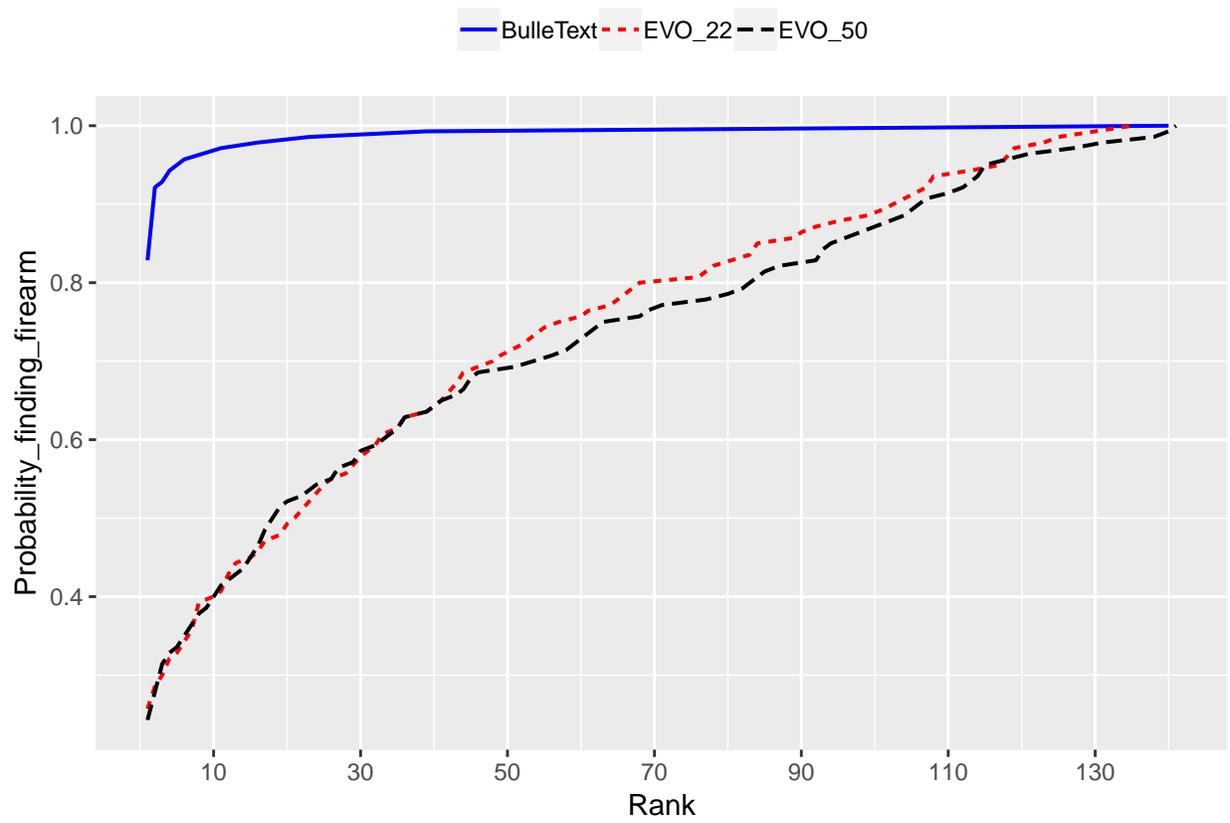


Figure 27: Courbes *CMC* obtenues par les systèmes *EVOFINDER* (deux variantes) et *BulleText* dans le cas *2VS6*. Taille de la base de données : 140

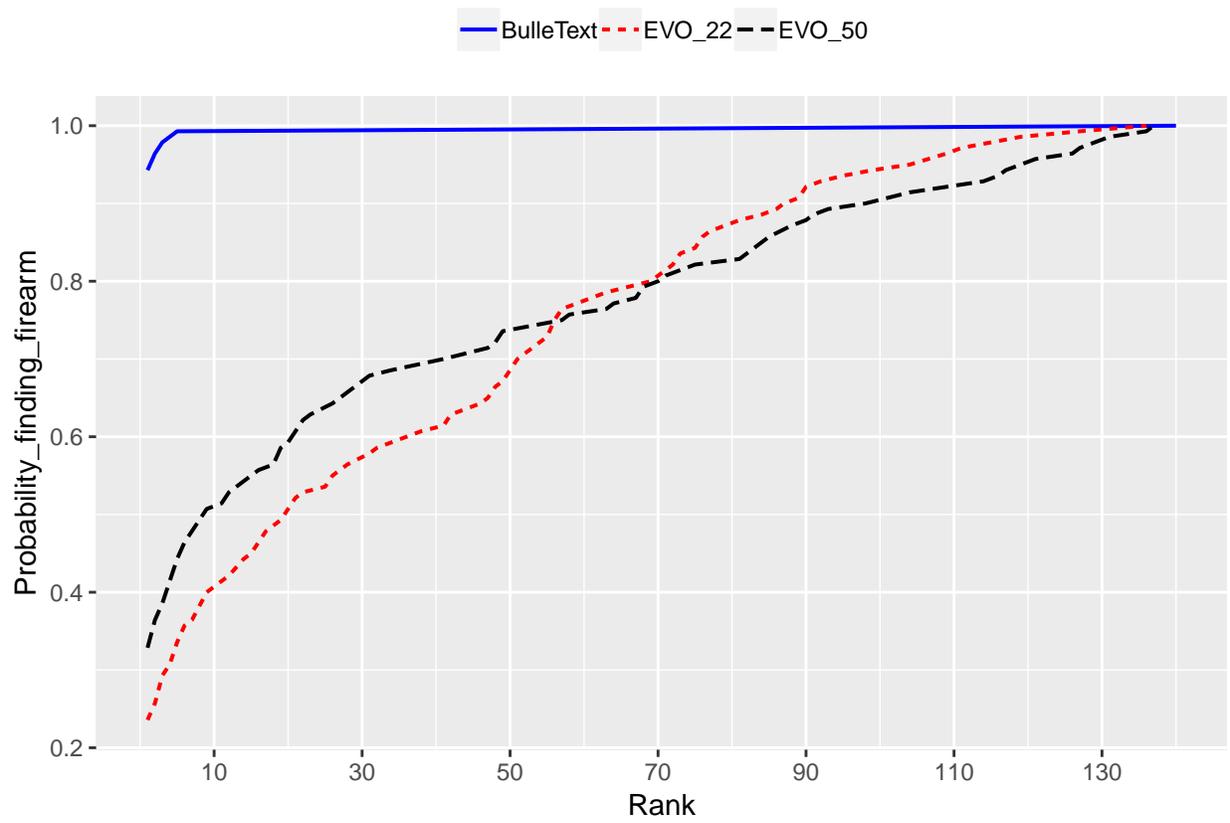


Figure 28: Courbes *CMC* obtenues par les systèmes *EVOFINDER* (deux variantes) et *BulleText* dans le cas *3VS6*. Taille de la base de données : 140

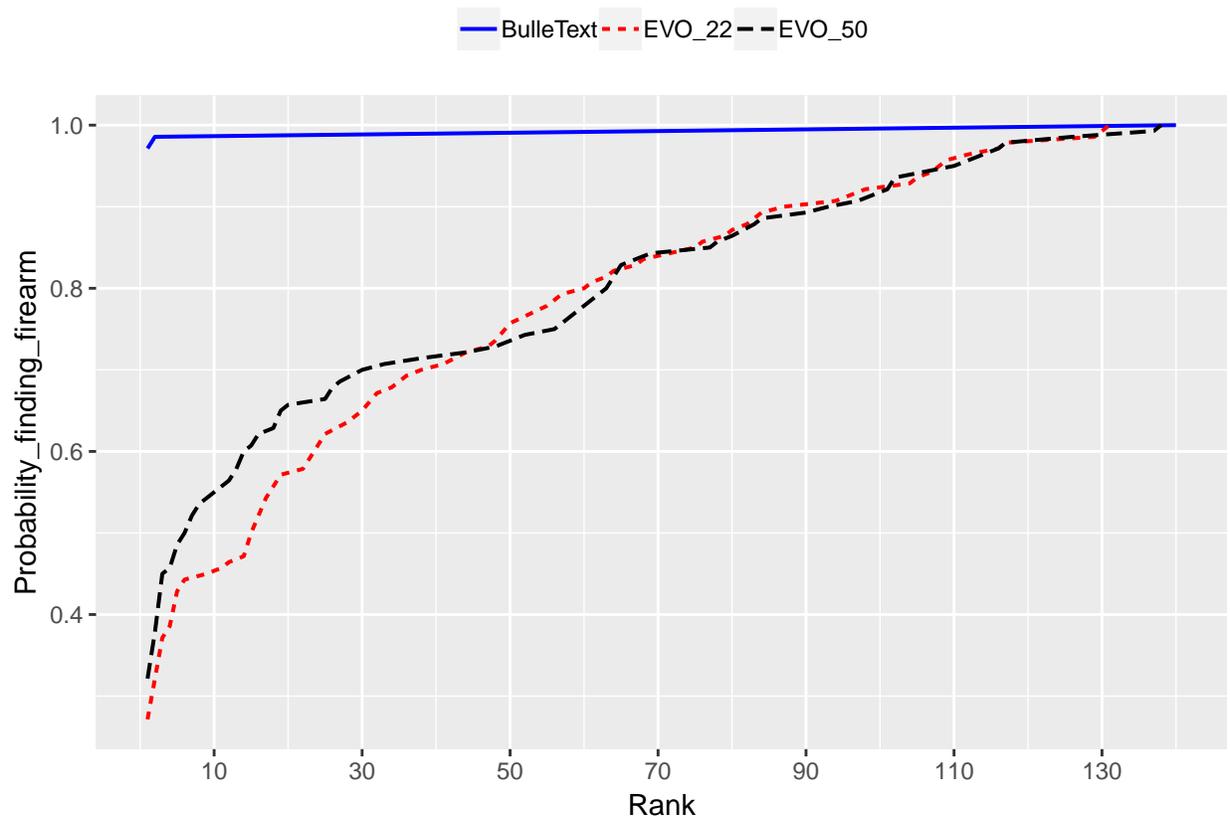


Figure 29: Courbes *CMC* obtenues par les systèmes *EVOFINDER* (deux variantes) et *BulleText* dans le cas  $4VS6$ . Taille de la base de données : 140

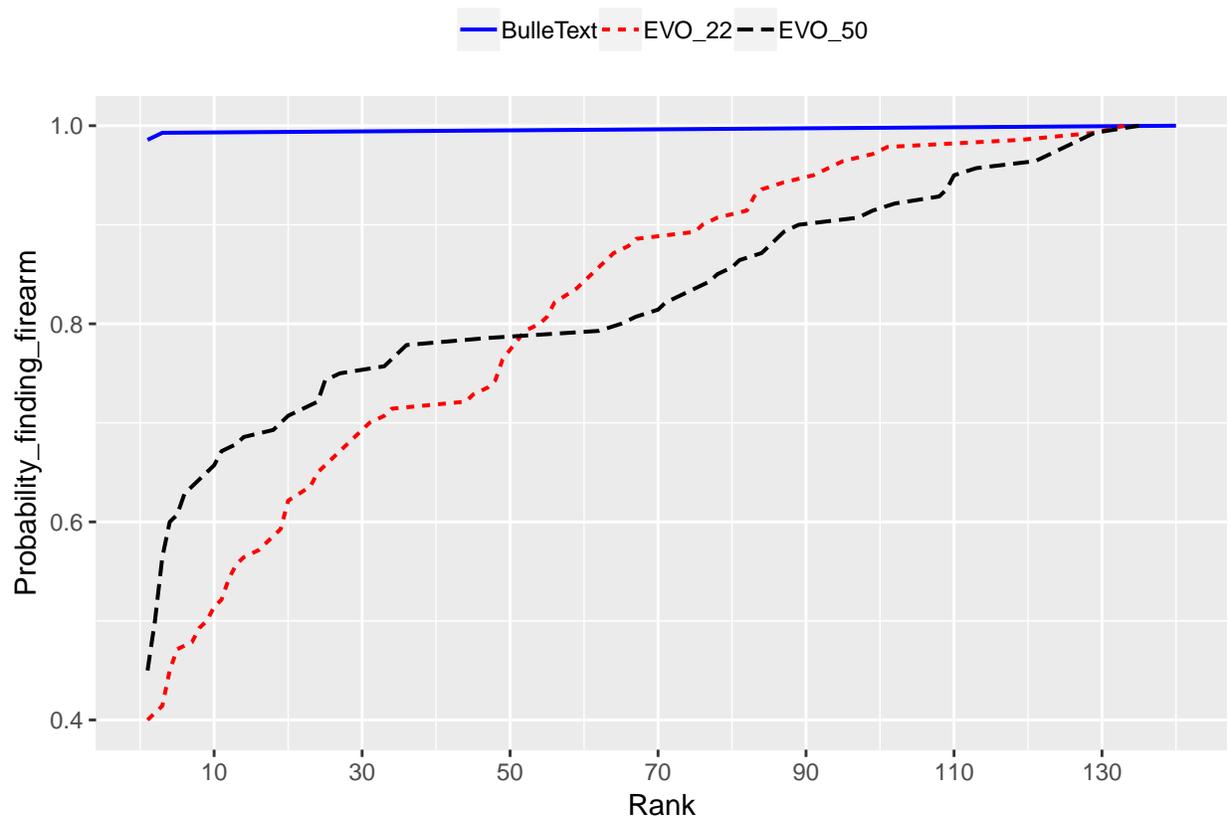


Figure 30: Courbes *CMC* obtenues par les systèmes *EVOFINDER* (deux variantes) et *BulleText* dans le cas *5VS6*. Taille de la base de données : 140

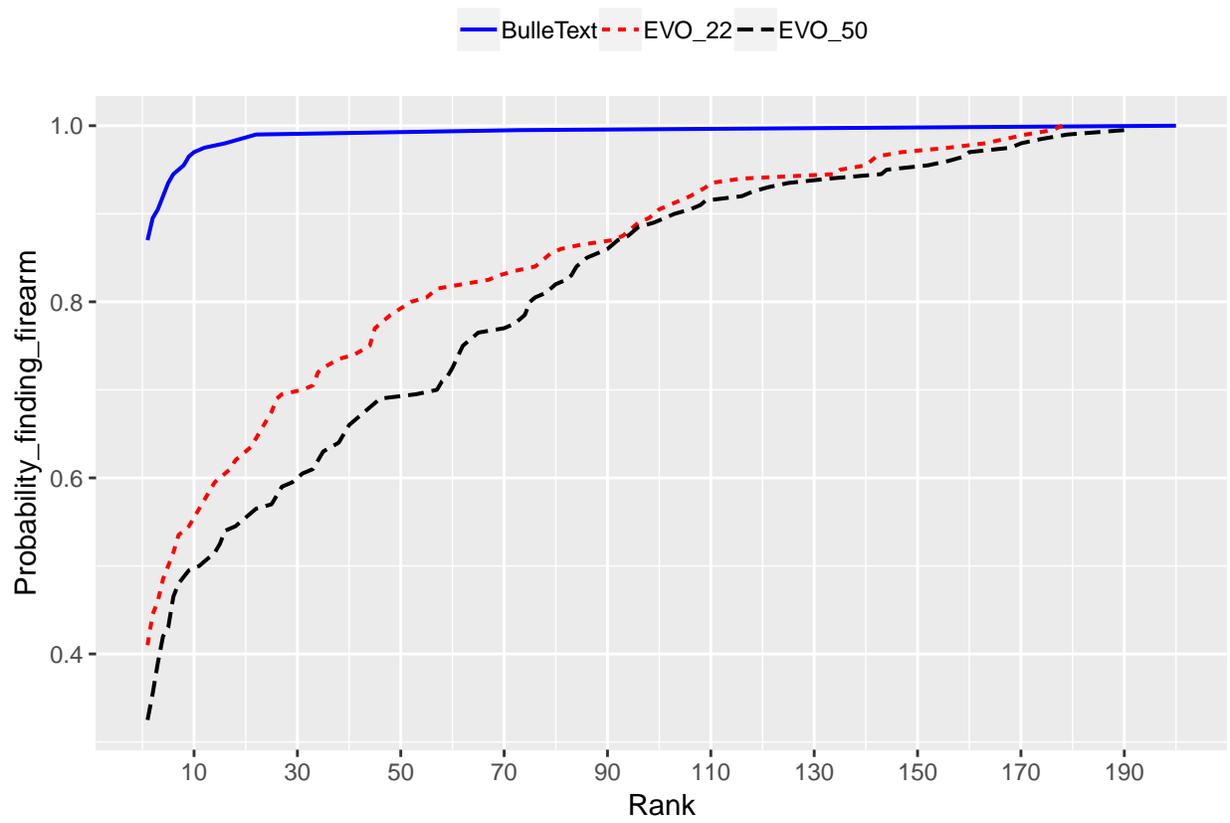


Figure 31: Courbes *CMC* obtenues par les systèmes *EVOFINDER* (deux variantes) et *BulleText* dans le cas *3VS12*. Taille de la base de données : 200

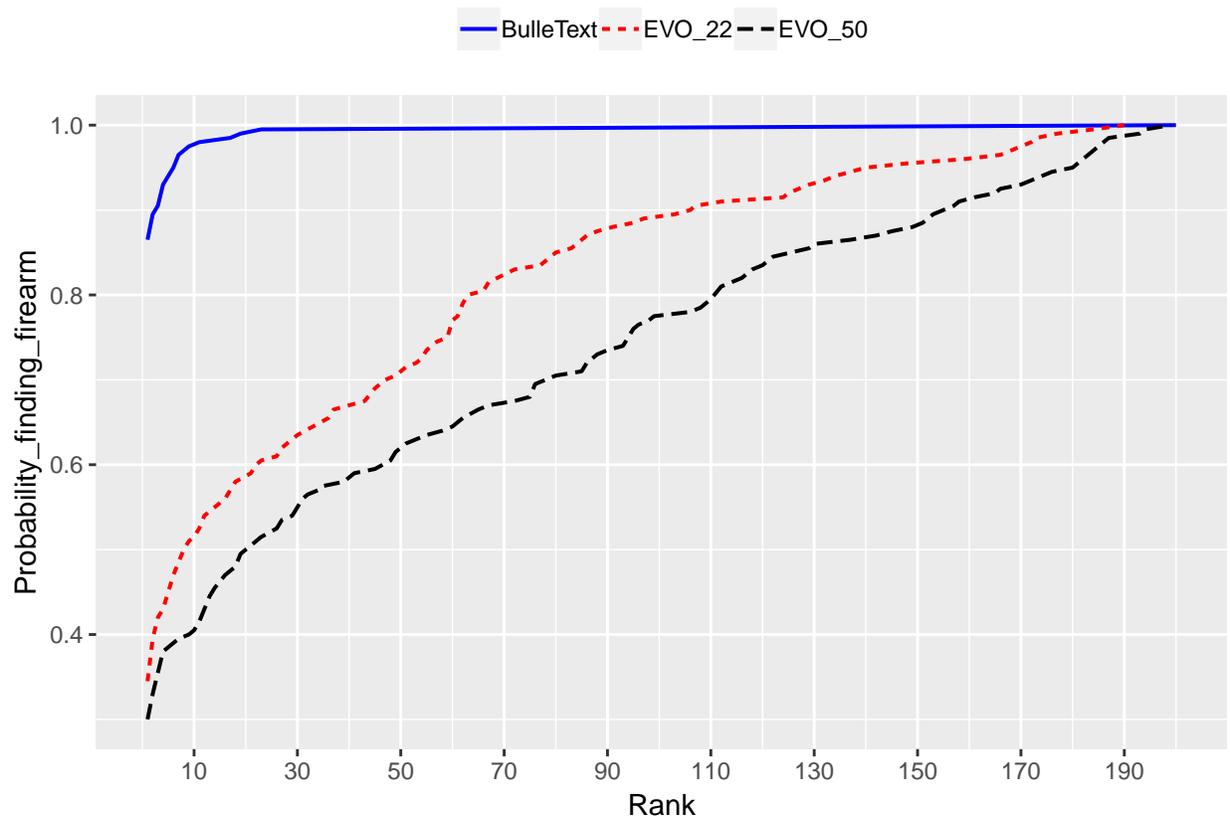


Figure 32: Courbes *CMC* obtenues par les systèmes *EVOFINDER* (deux variantes) et *BulleText* dans le cas  $4VS12$ . Taille de la base de données : 200

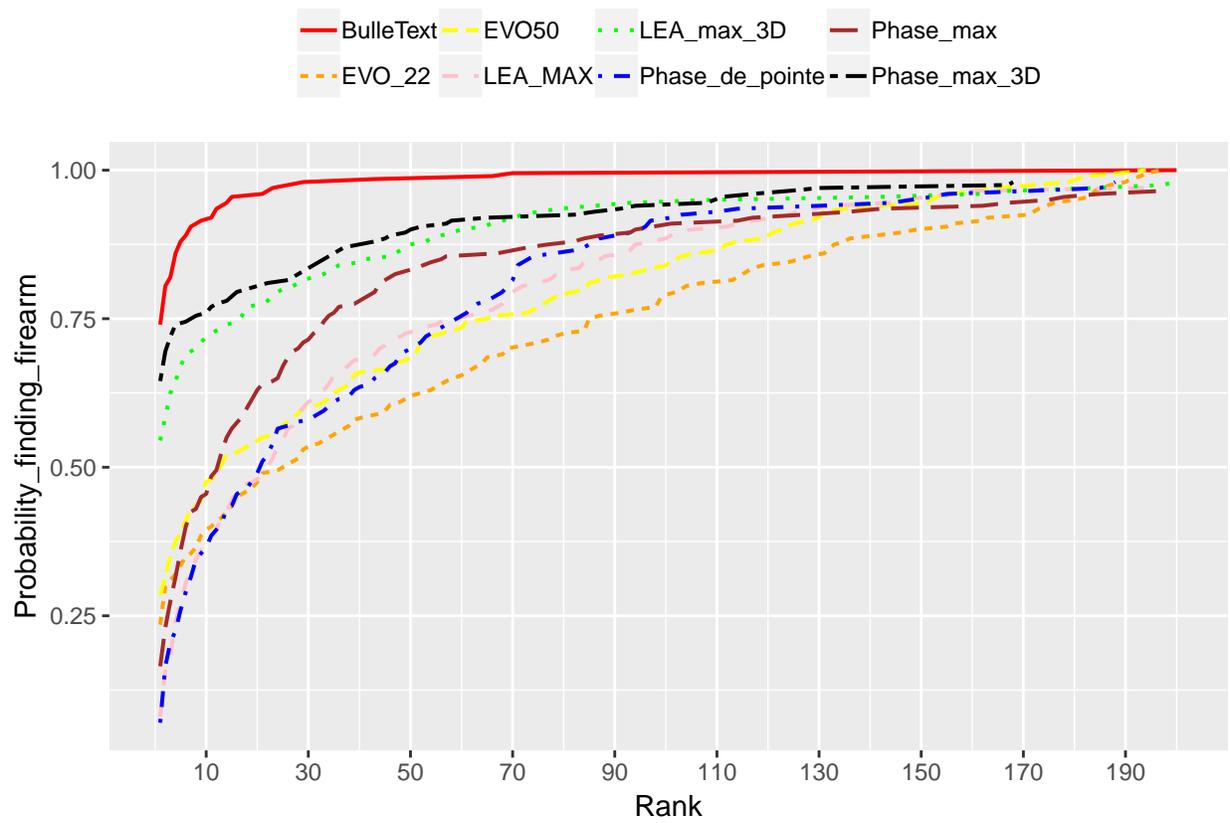


Figure 33: Courbes *CMC* obtenues par les systèmes *EVOFINDER* (deux variantes), *IBIS TRAX3D* (cinq variantes) et *BulleText* dans le cas *5VS12*. Taille de la base de données : 200

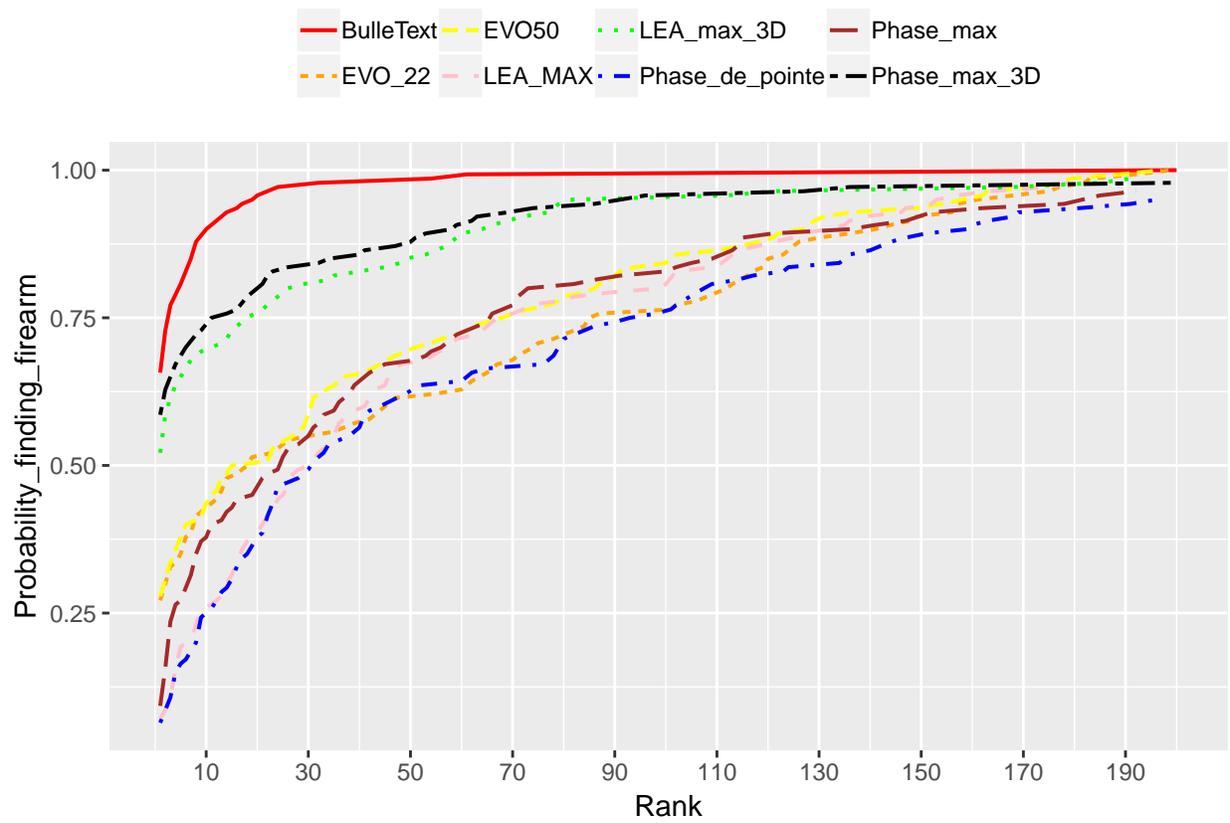


Figure 34: Courbes *CMC* obtenues par les systèmes *EVOFINDER* (deux variantes), *IBIS TRAX3D* (cinq variantes) et *BulleText* dans le cas *6VS12*. Taille de la base de données : 200

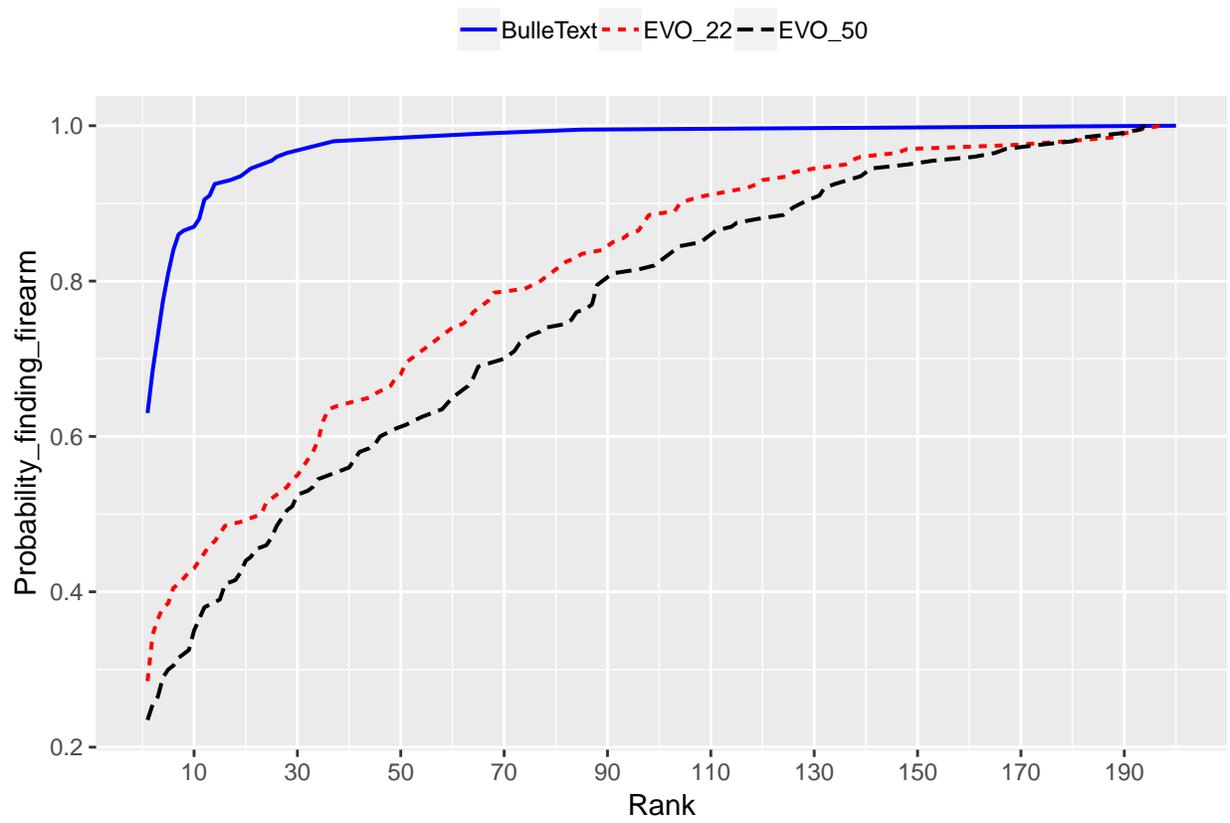


Figure 35: Courbes *CMC* obtenues par les systèmes *EVOFINDER* (deux variantes) et *BulleText* dans le cas *1VS23*. Taille de la base de données : 200

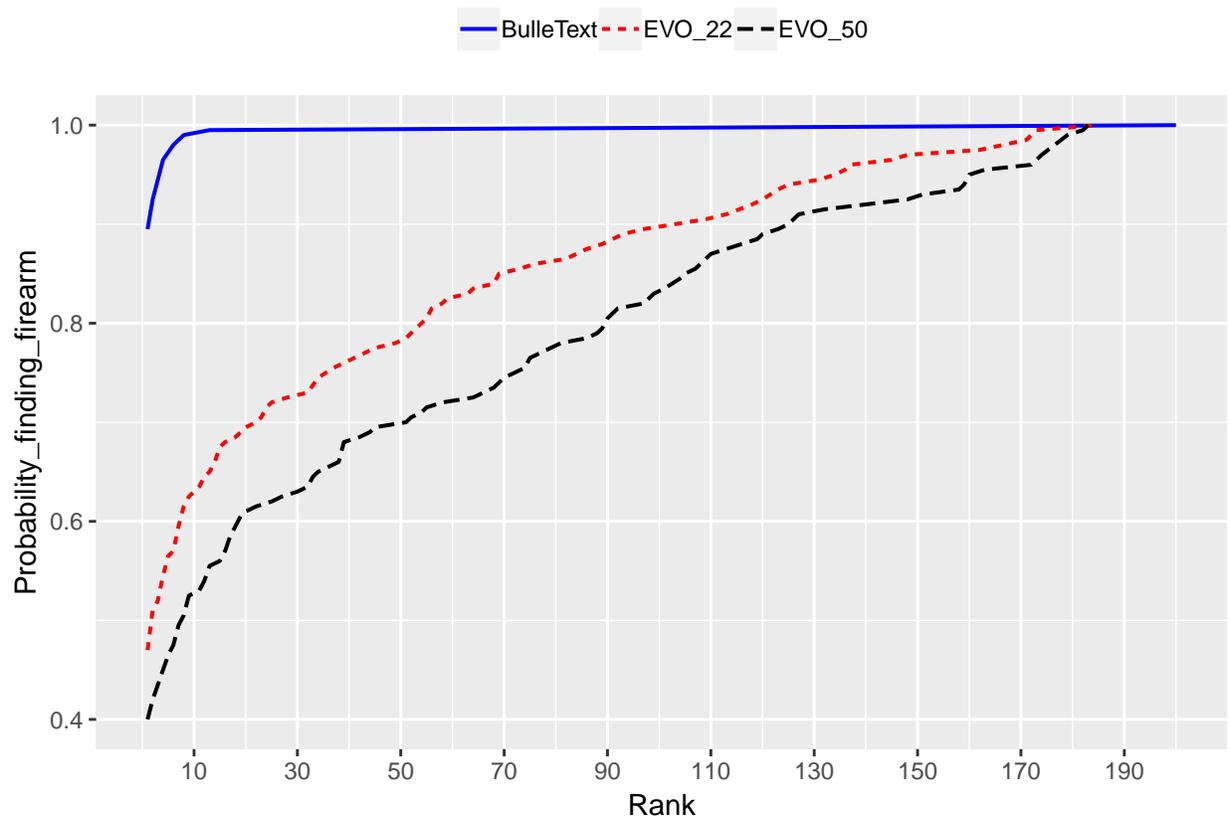


Figure 36: Courbes *CMC* obtenues par les systèmes *EVOFINDER* (deux variantes) et *BulleText* dans le cas  $4VS23$ . Taille de la base de données : 200

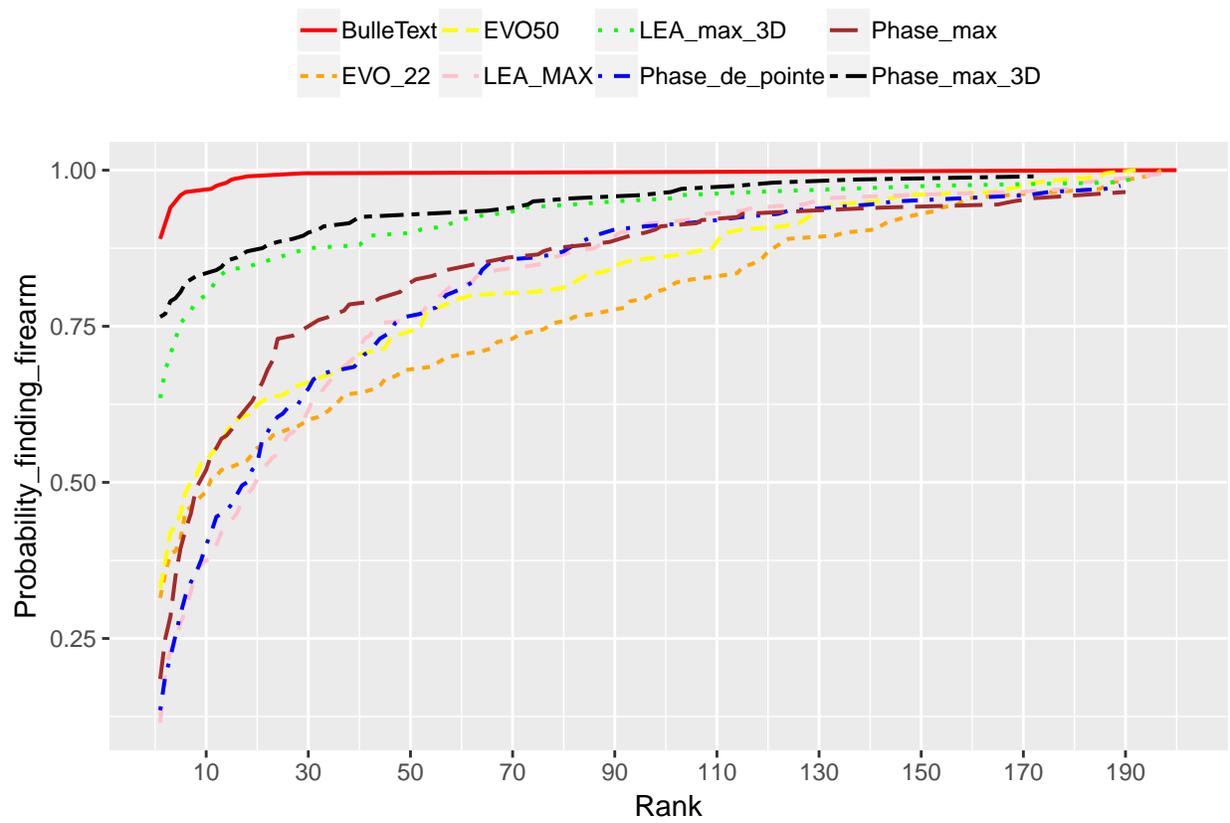


Figure 37: Courbes *CMC* obtenues par les systèmes *EVOFINDER* (deux variantes), *IBIS TRAX3D* (cinq variantes) et *BulleText* dans le cas *5VS23*. Taille de la base de données : 200

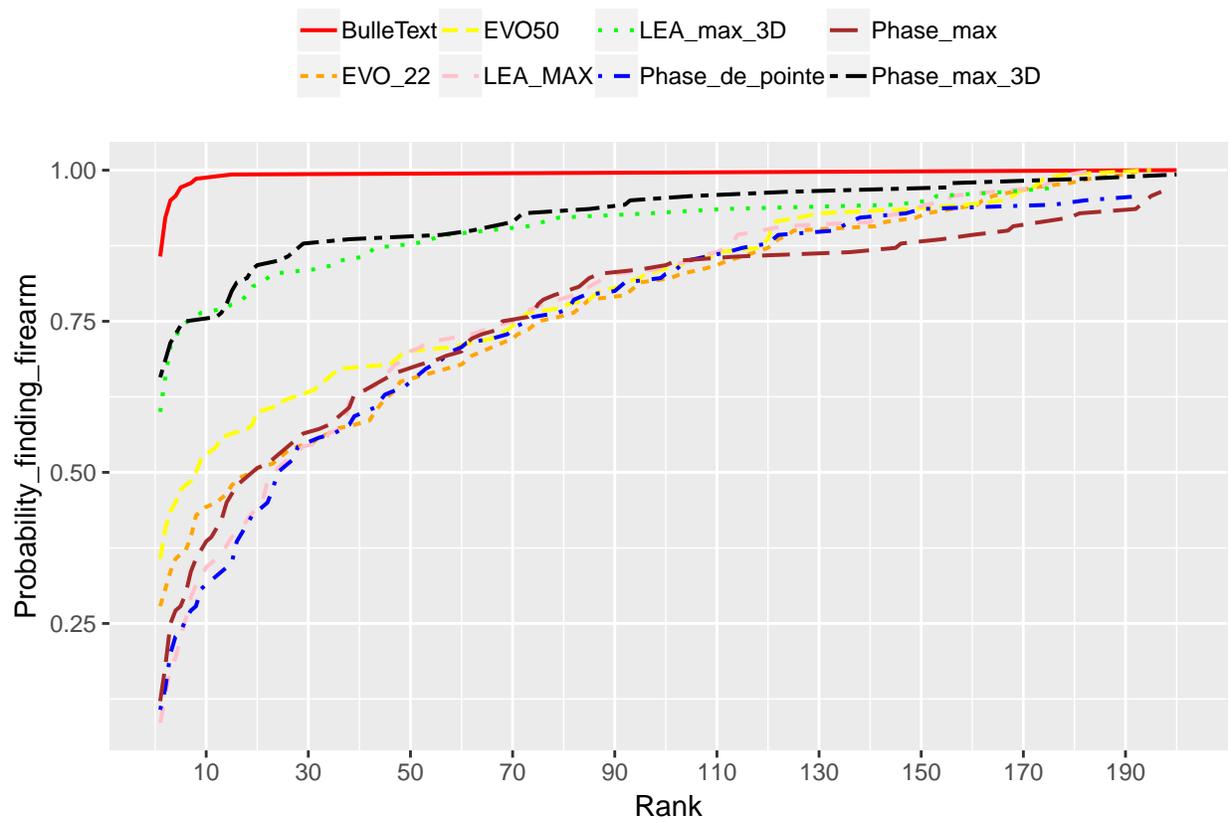


Figure 38: Courbes *CMC* obtenues par les systèmes *EVOFINDER* (deux variantes), *IBIS TRAX3D* (cinq variantes) et *BulleText* dans le cas *6VS23*. Taille de la base de données : 200

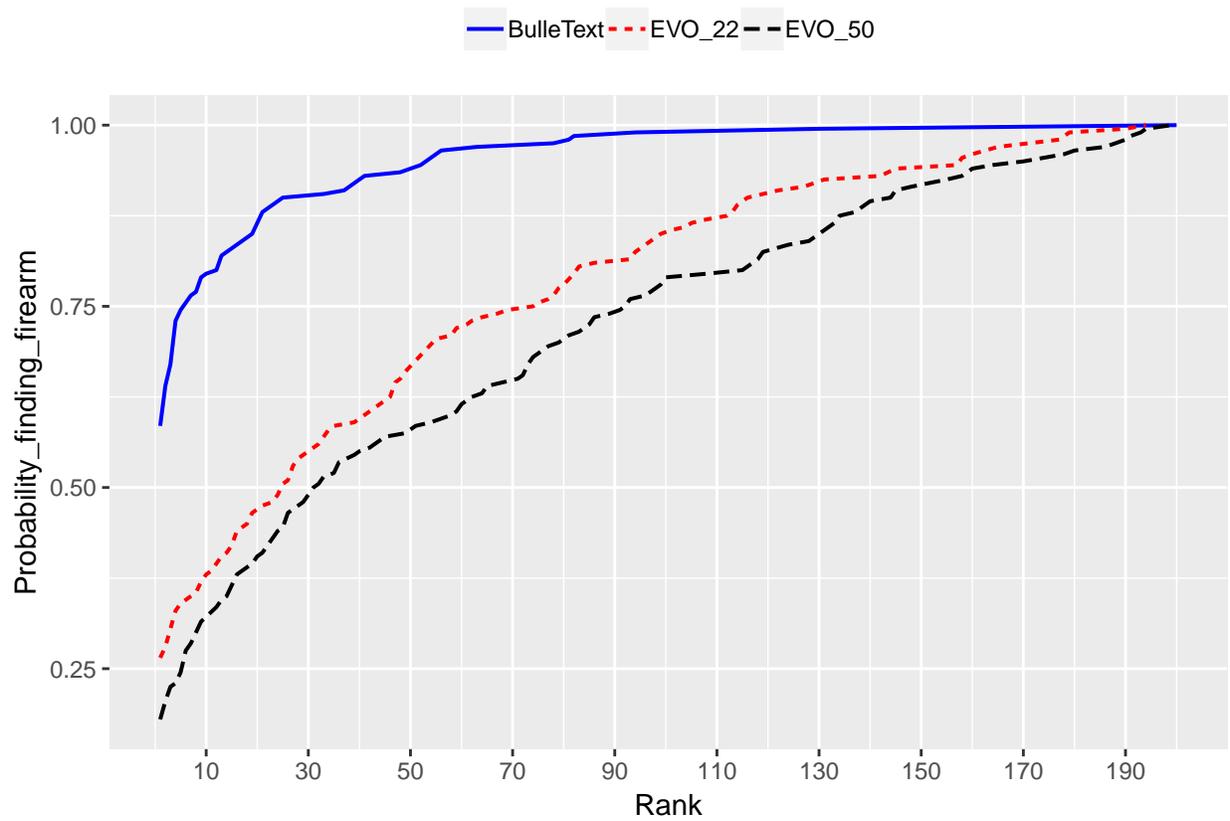


Figure 39: Courbes *CMC* obtenues par les systèmes *EVOFINDER* (deux variantes) et *BulleText* dans le cas *1VS34*. Taille de la base de données : 200

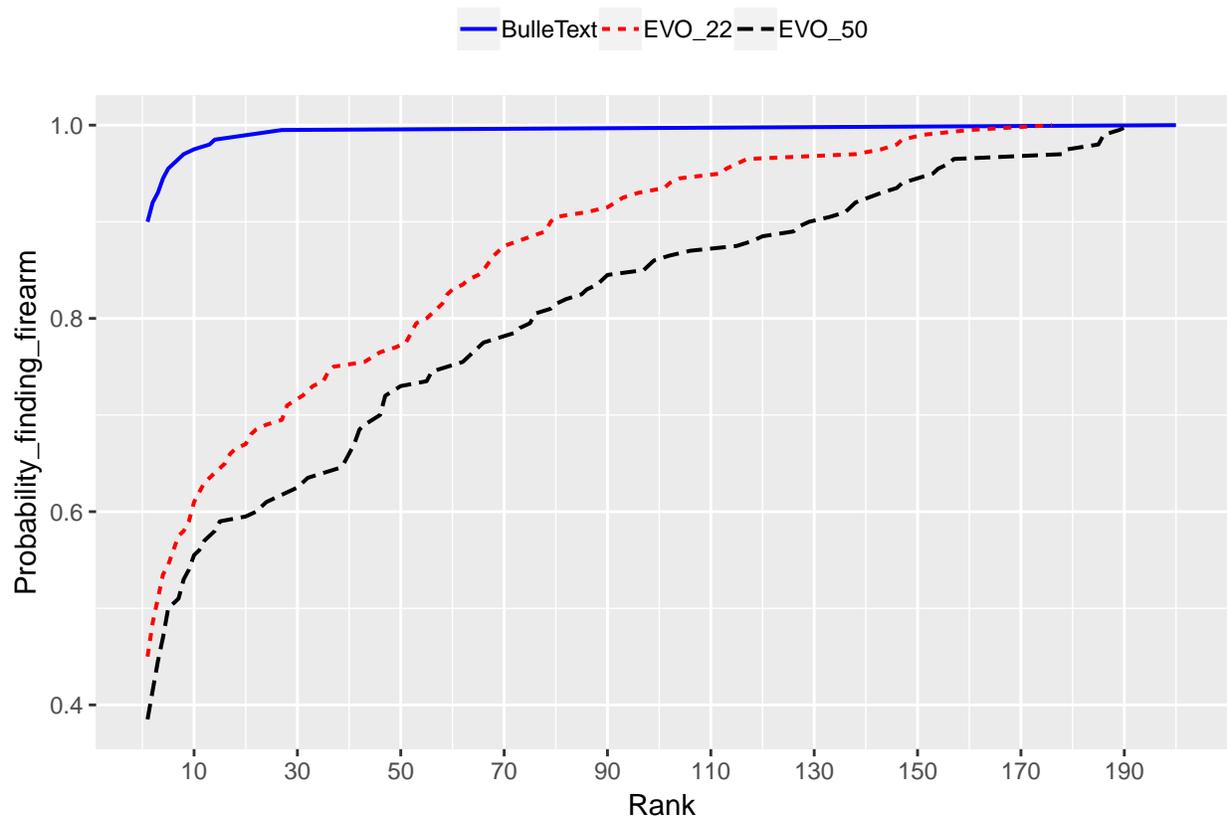


Figure 40: Courbes *CMC* obtenues par les systèmes *EVOFINDER* (deux variantes) et *BulleText* dans le cas *2VS34*. Taille de la base de données : 200

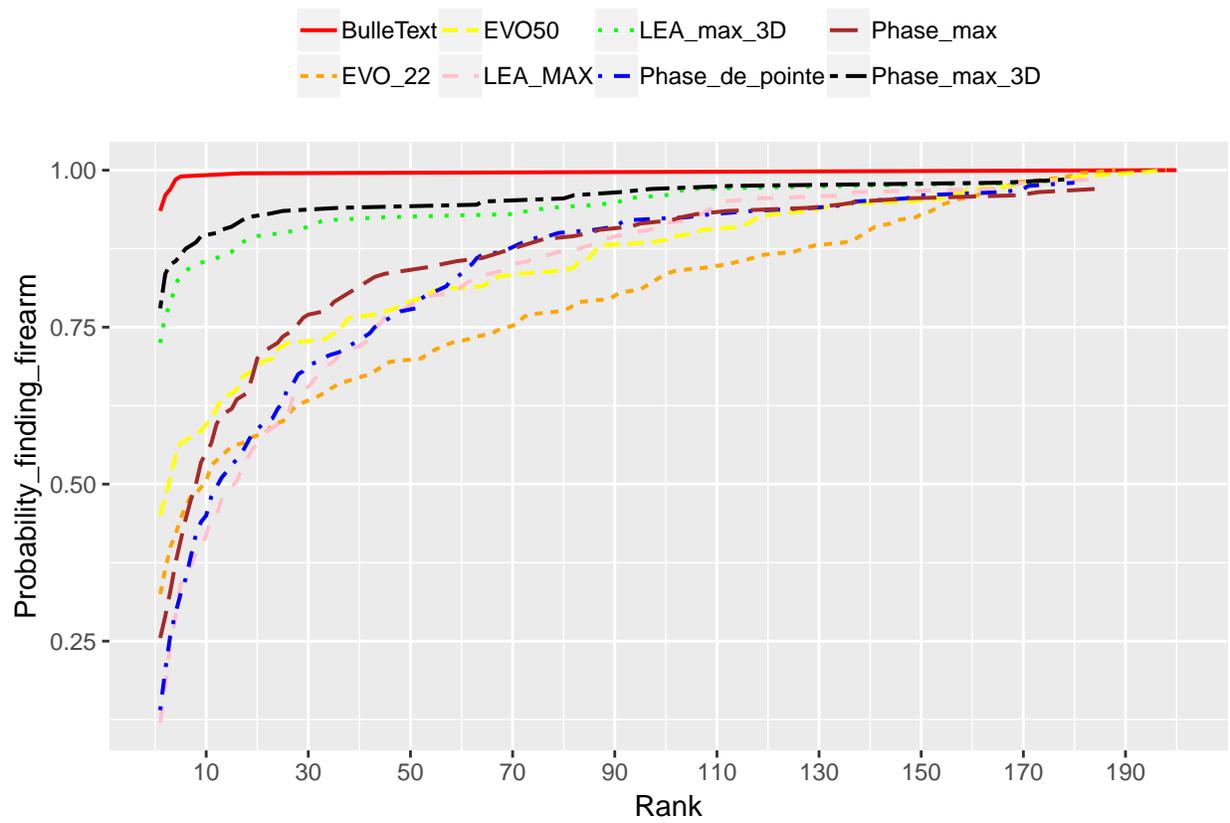


Figure 41: Courbes *CMC* obtenues par les systèmes *EVOFINDER* (deux variantes), *IBIS TRAX3D* (cinq variantes) et *BulleText* dans le cas *5VS34*. Taille de la base de données : 200

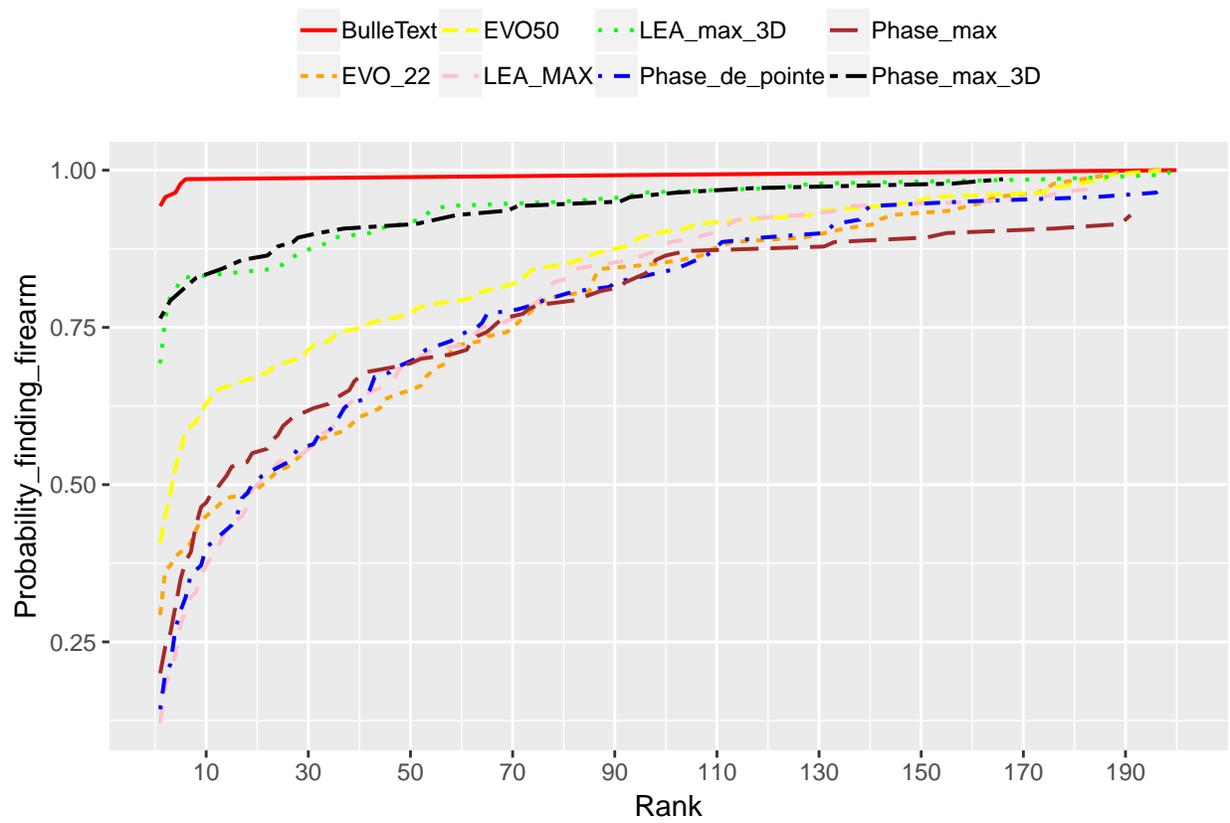


Figure 42: Courbes *CMC* obtenues par les systèmes *EVOFINDER* (deux variantes), *IBIS TRAX3D* (cinq variantes) et *BulleText* dans le cas *6VS34*. Taille de la base de données : 200

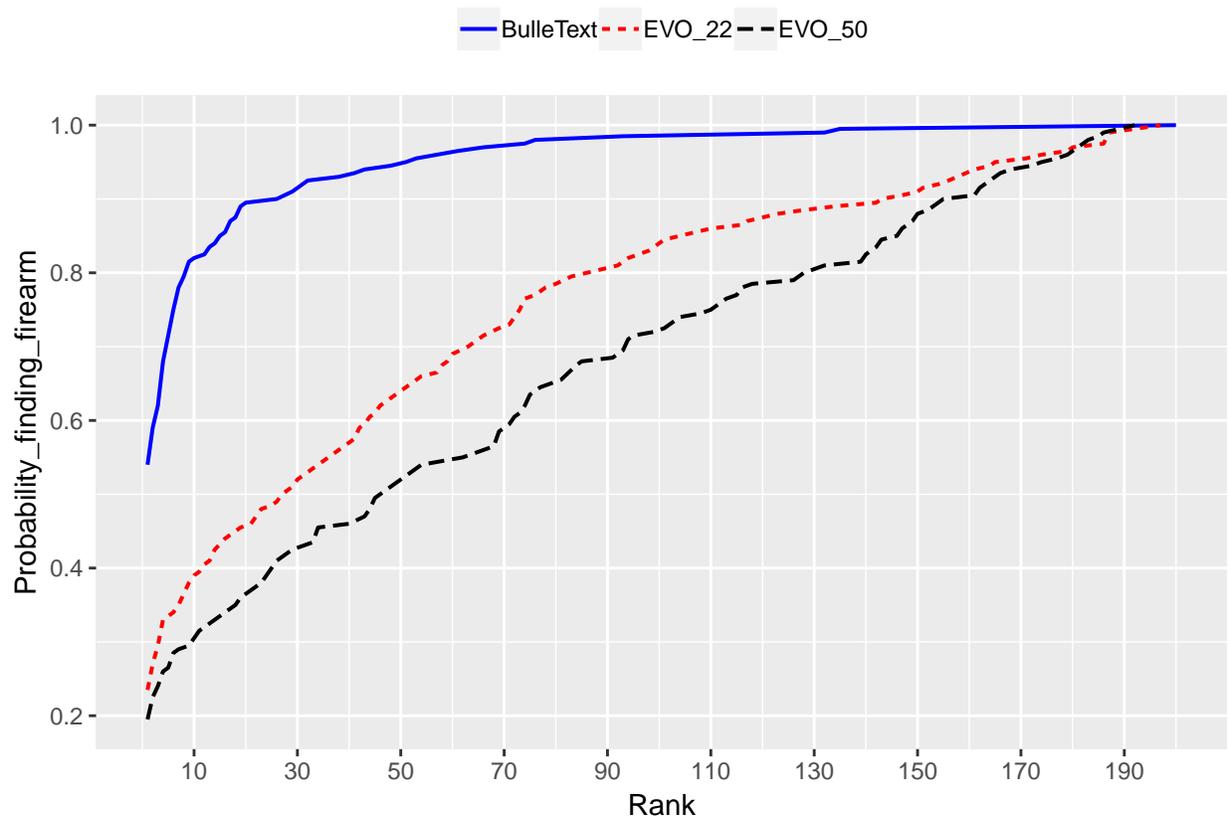


Figure 43: Courbes *CMC* obtenues par les systèmes *EVOFINDER* (deux variantes) et *BulleText* dans le cas *1VS45*. Taille de la base de données : 200

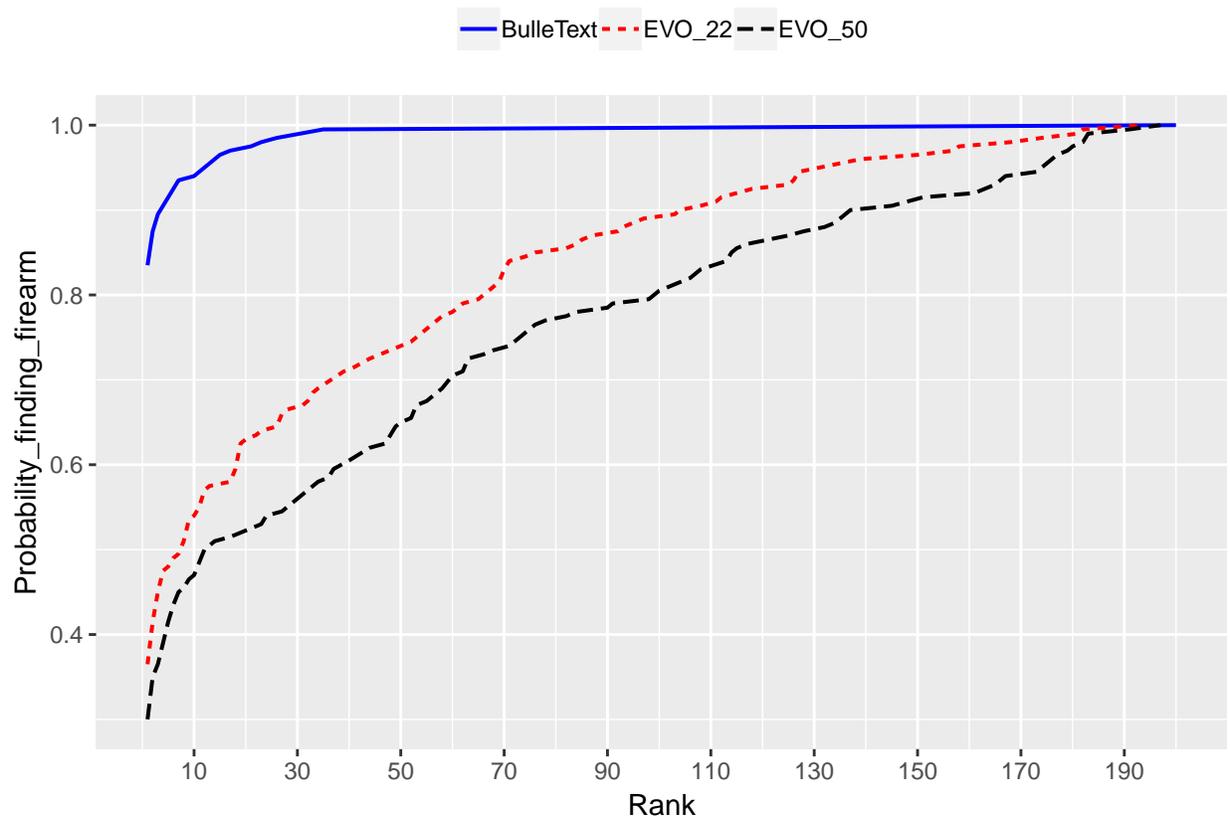


Figure 44: Courbes *CMC* obtenues par les systèmes *EVOFINDER* (deux variantes) et *BulleText* dans le cas *2VS45*. Taille de la base de données : 200

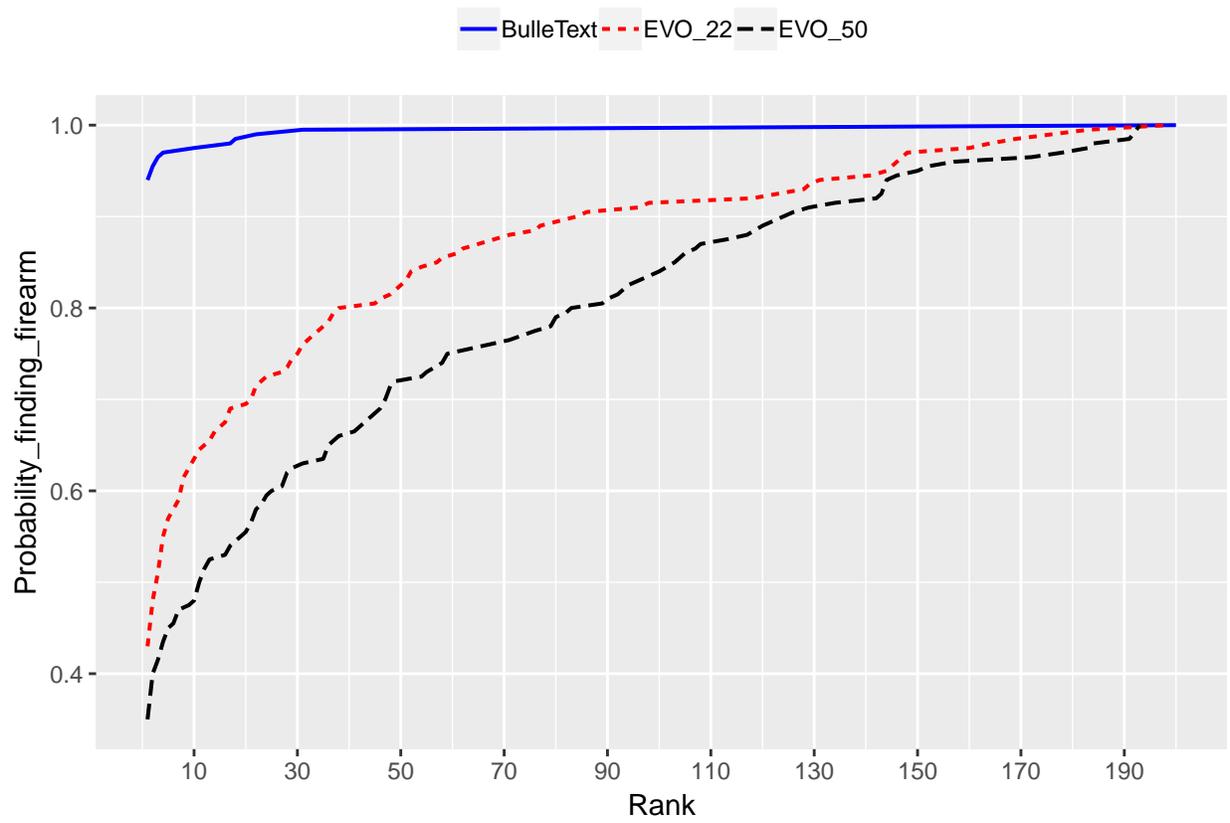


Figure 45: Courbes *CMC* obtenues par les systèmes *EVOFINDER* (deux variantes) et *BulleText* dans le cas *3VS45*. Taille de la base de données : 200

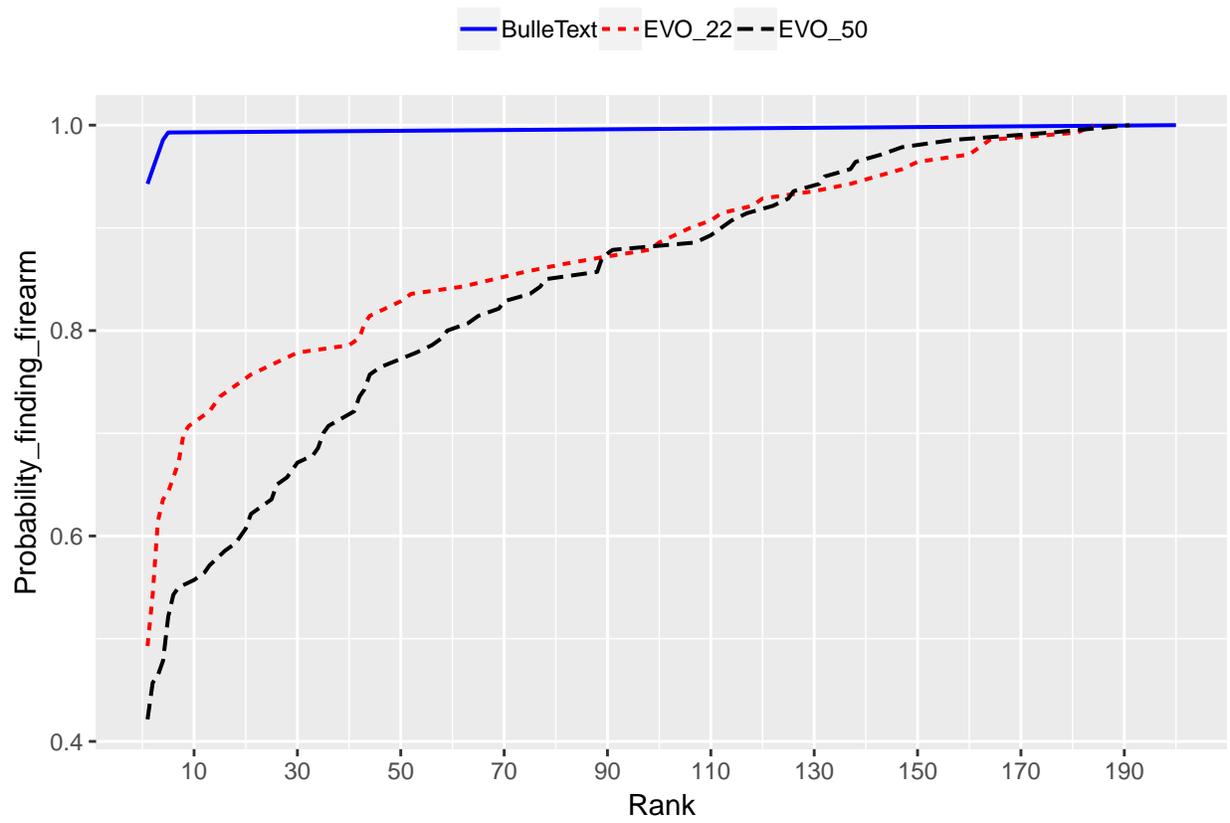


Figure 46: Courbes *CMC* obtenues par les systèmes *EVOFINDER* (deux variantes) et *BulleText* dans le cas *6VS45*. Taille de la base de données : 200

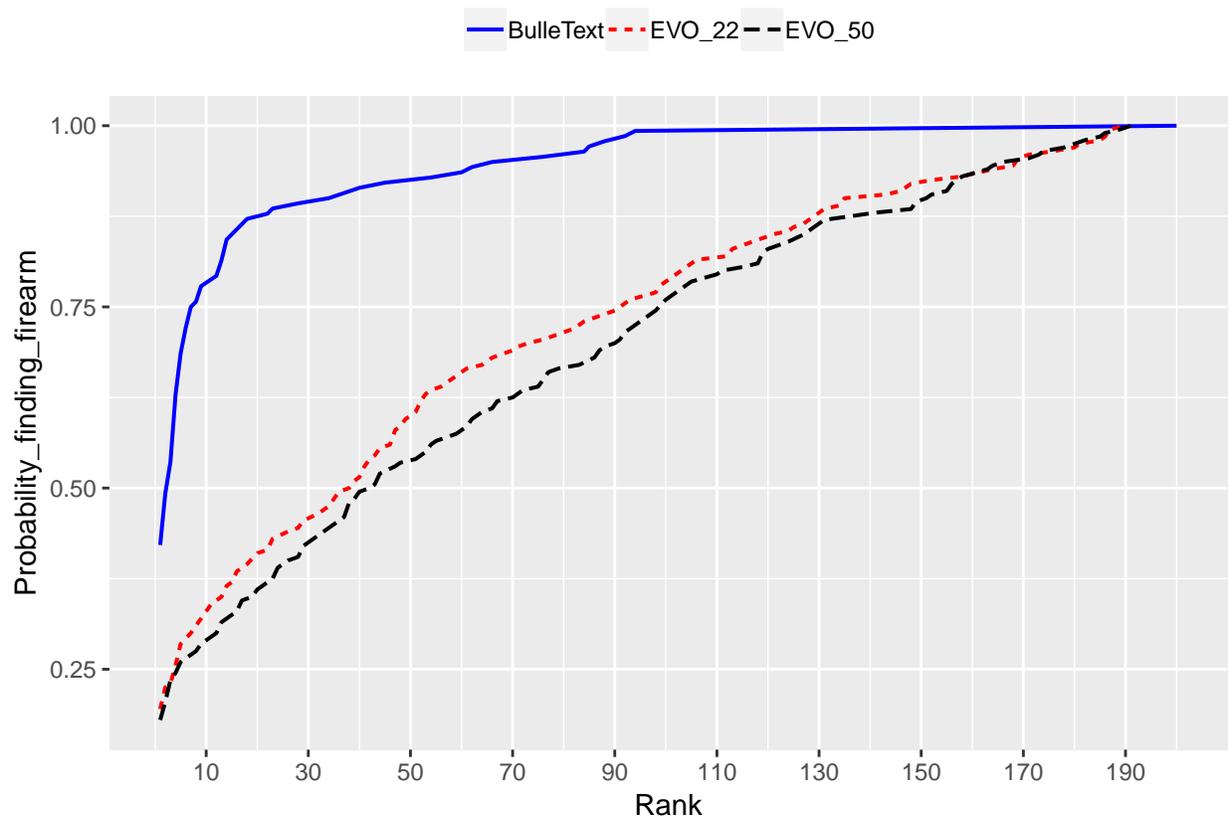


Figure 47: Courbes *CMC* obtenues par les systèmes *EVOFINDER* (deux variantes) et *BulleText* dans le cas *1VS56*. Taille de la base de données : 140

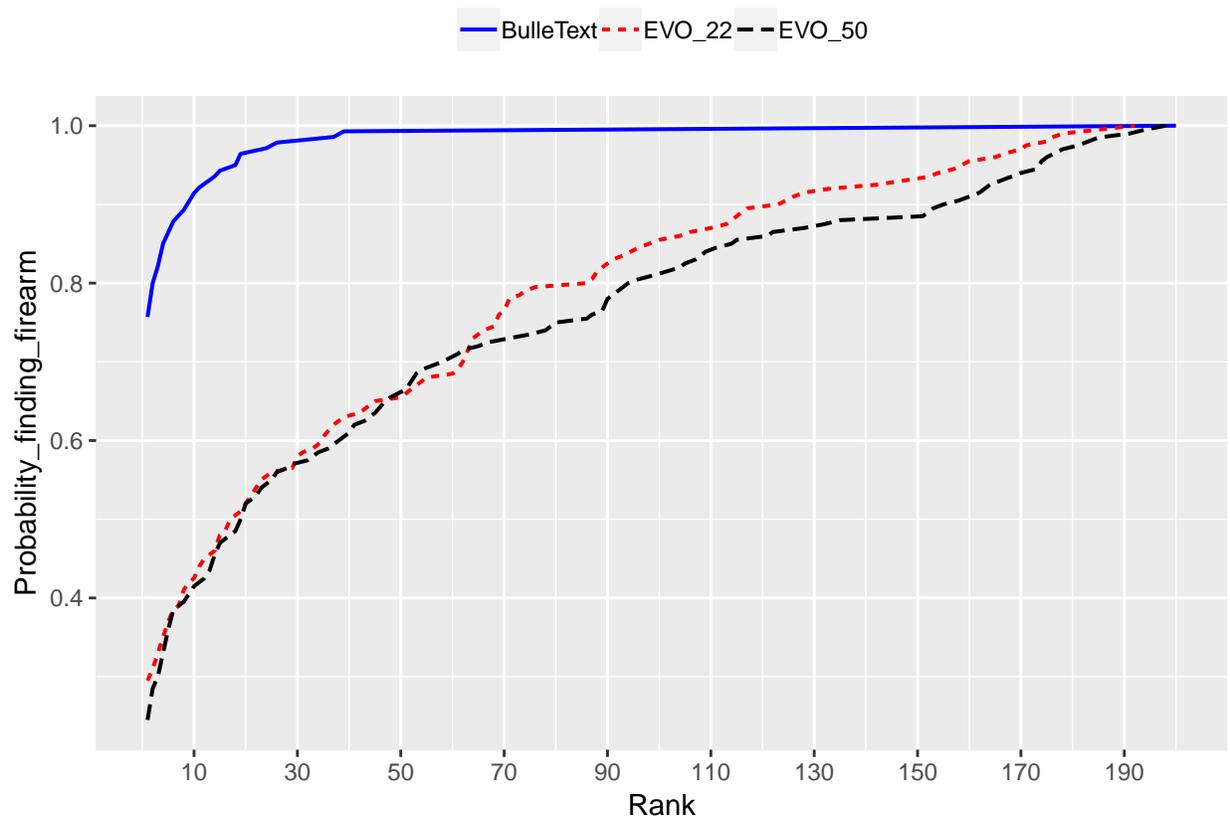


Figure 48: Courbes *CMC* obtenues par les systèmes *EVOFINDER* (deux variantes) et *BulleText* dans le cas *2VS56*. Taille de la base de données : 200

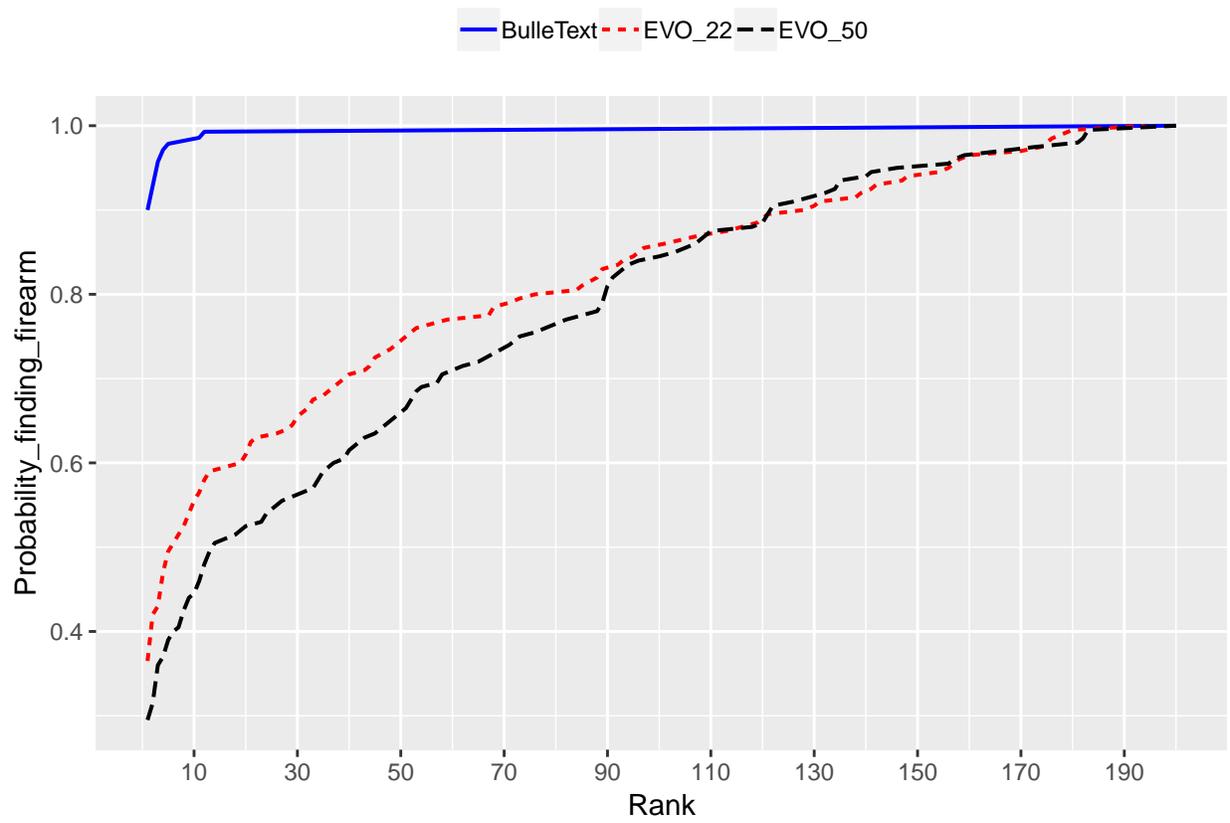


Figure 49: Courbes *CMC* obtenues par les systèmes *EVOFINDER* (deux variantes) et *BulleText* dans le cas *3VS56*. Taille de la base de données : 200

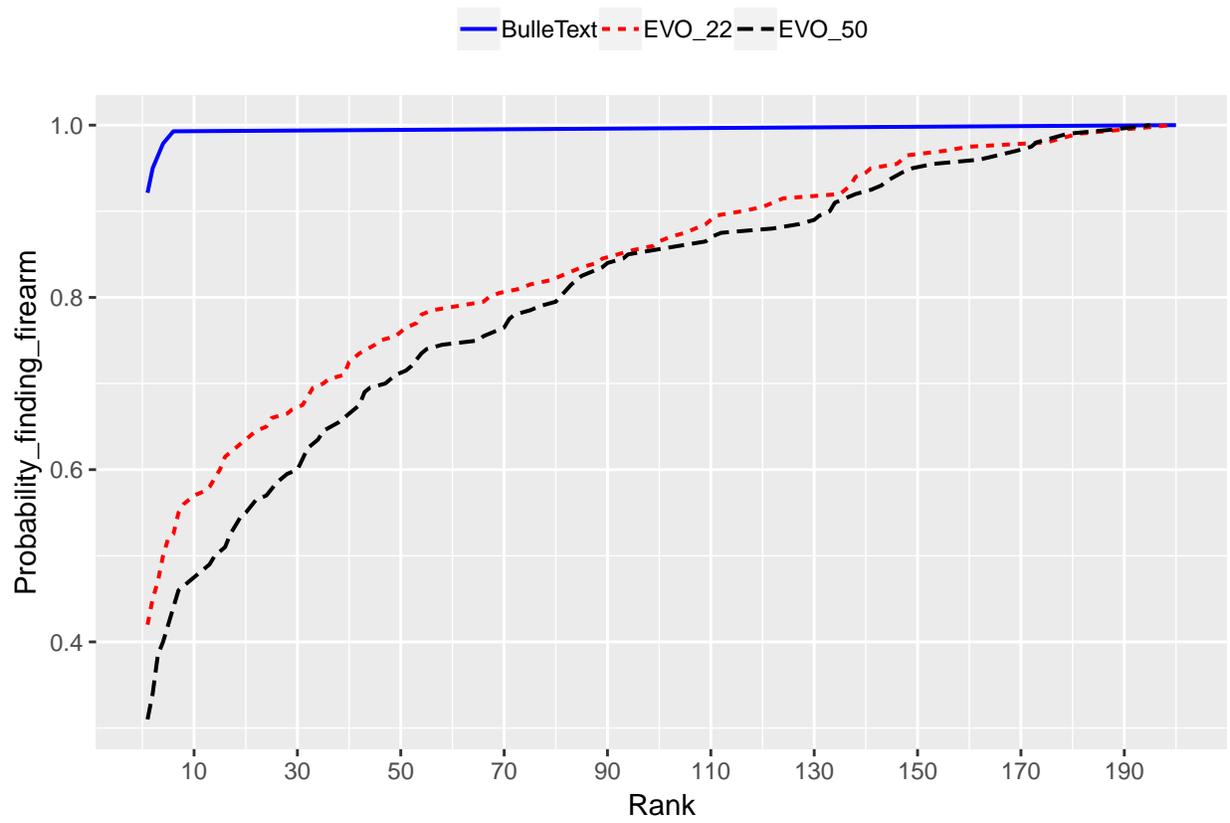


Figure 50: Courbes *CMC* obtenues par les systèmes *EVOFINDER* (deux variantes) et *BulleText* dans le cas  $4VS56$ . Taille de la base de données : 200

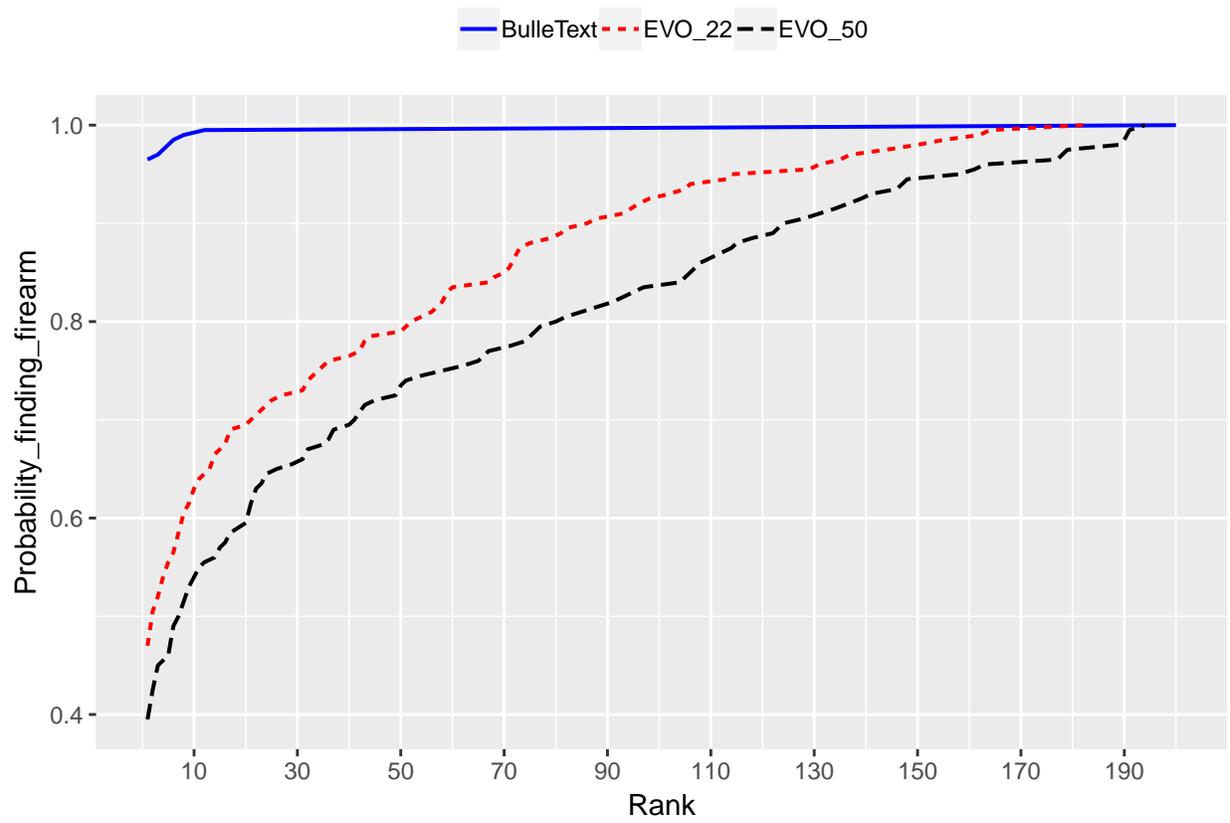


Figure 51: Courbes *CMC* obtenues par les systèmes *EVOFINDER* (deux variantes) et *BulleText* dans le cas  $4VS123$ . Taille de la base de données : 200

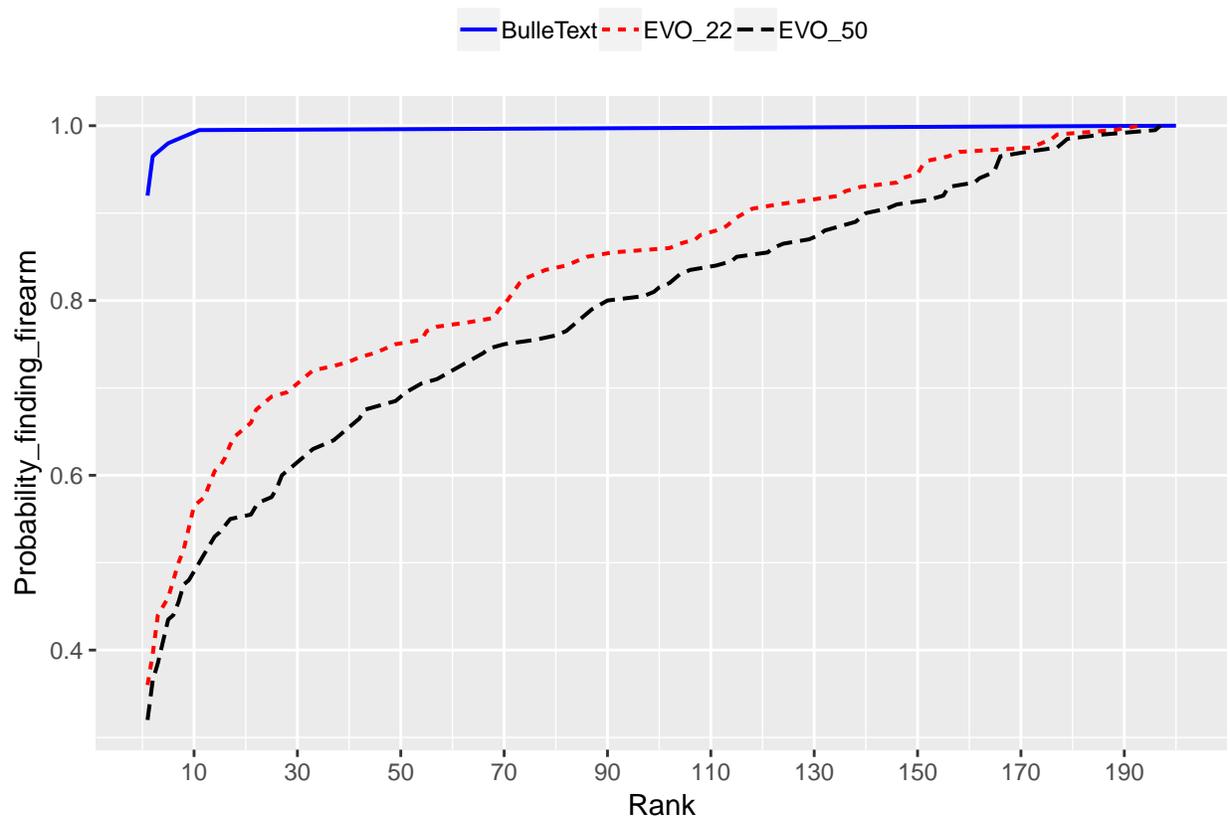


Figure 52: Courbes *CMC* obtenues par les systèmes *EVOFINDER* (deux variantes) et *BulleText* dans le cas *5VS123*. Taille de la base de données : 200

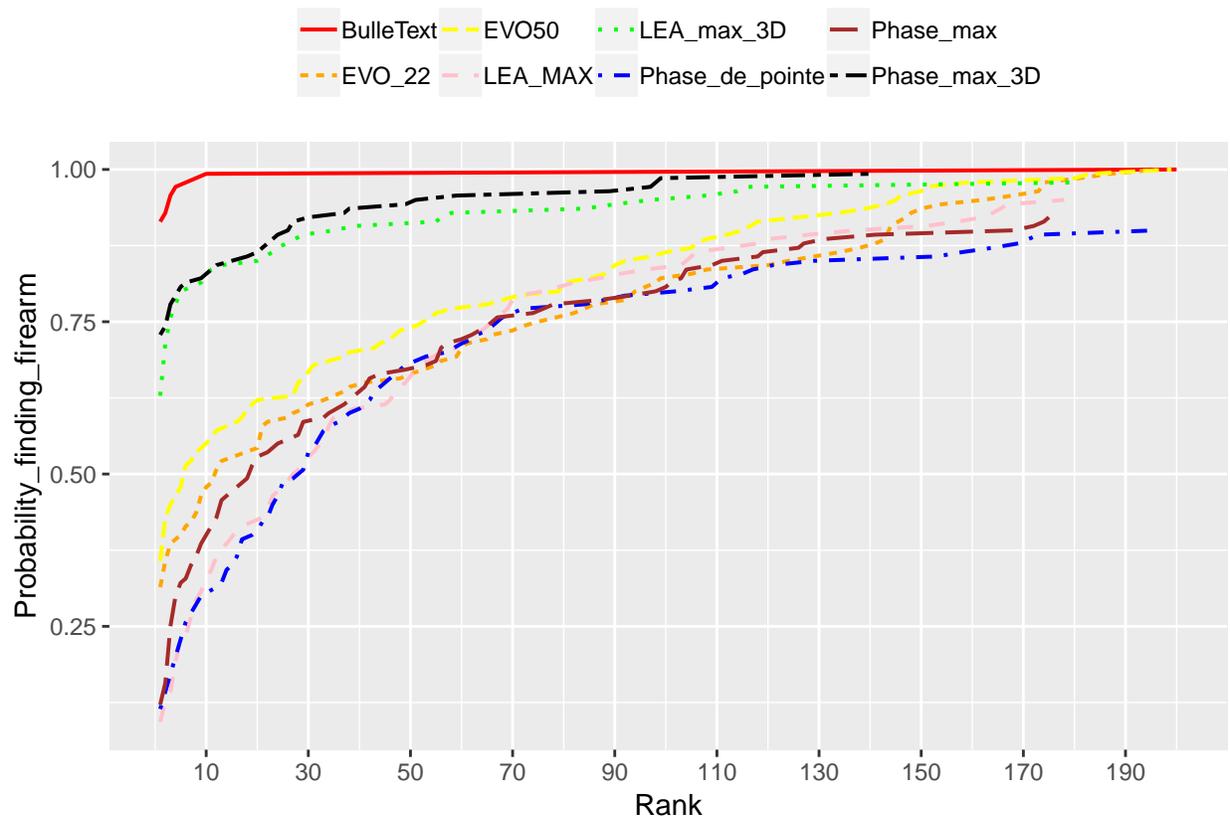


Figure 53: Courbes CMC obtenues par les systèmes *EVOFINDER* (deux variantes) et *BulleText* dans le cas *6VS123*. Taille de la base de données : 200

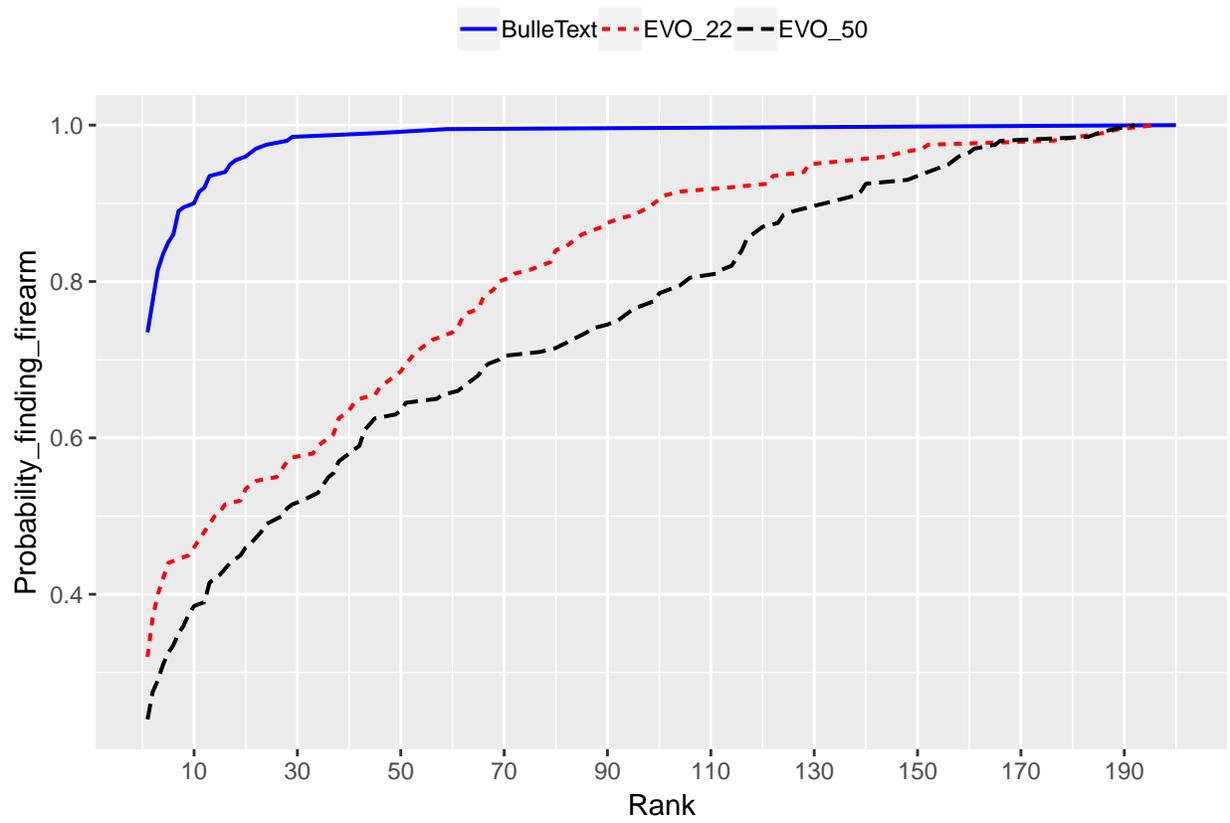


Figure 54: Courbes *CMC* obtenues par les systèmes *EVOFINDER* (deux variantes) et *BulleText* dans le cas *1VS234*. Taille de la base de données : 200

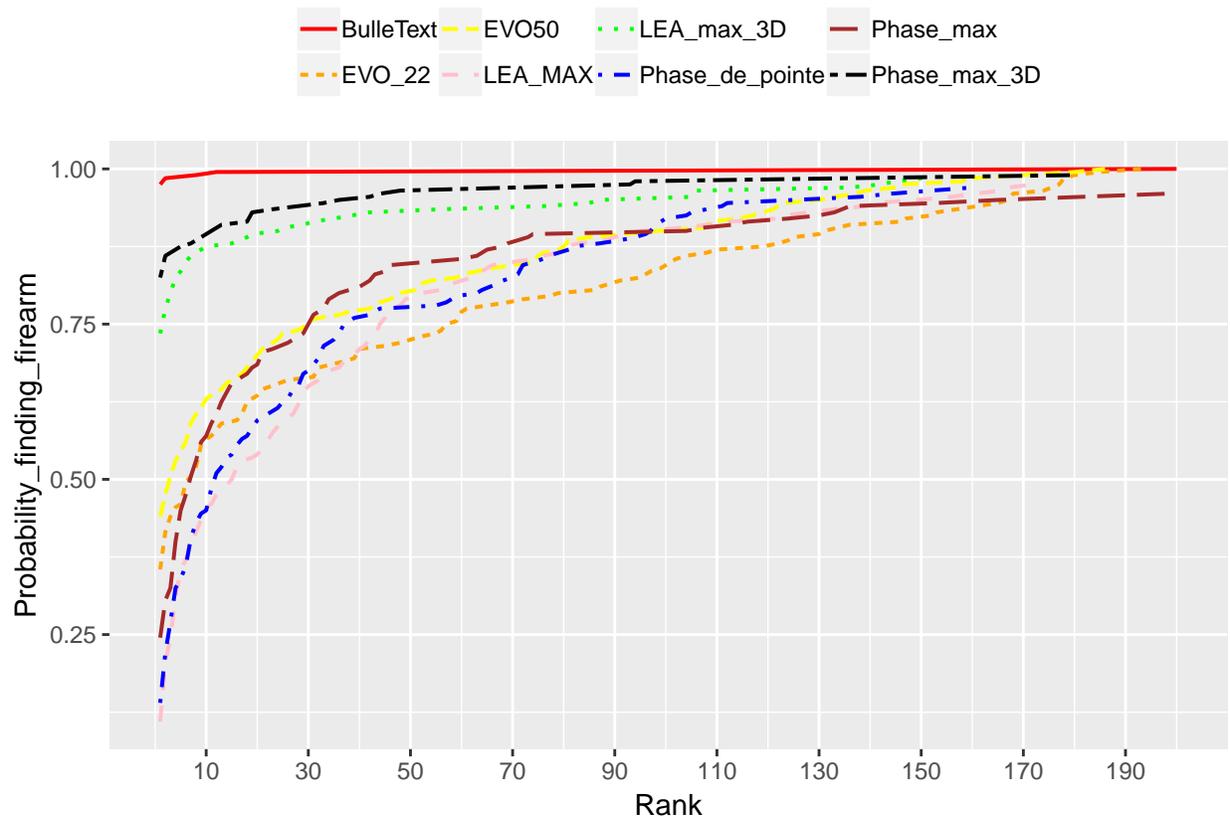


Figure 55: Courbes CMC obtenues par les systèmes *EVOFINDER* (deux variantes) et *BulleText* dans le cas 5VS234. Taille de la base de données : 200

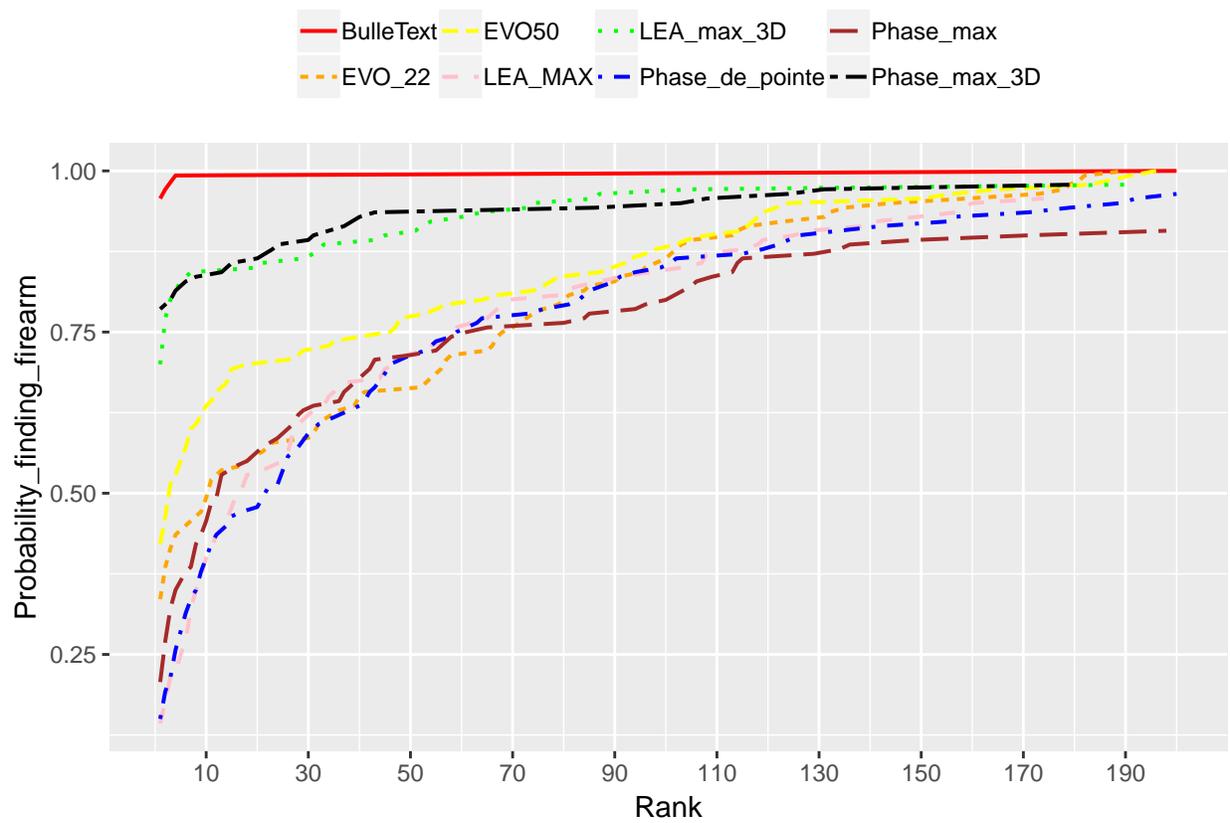


Figure 56: Courbes CMC obtenues par les systèmes *EVOFINDER* (deux variantes) et *BulleText* dans le cas *6VS234*. Taille de la base de données : 200

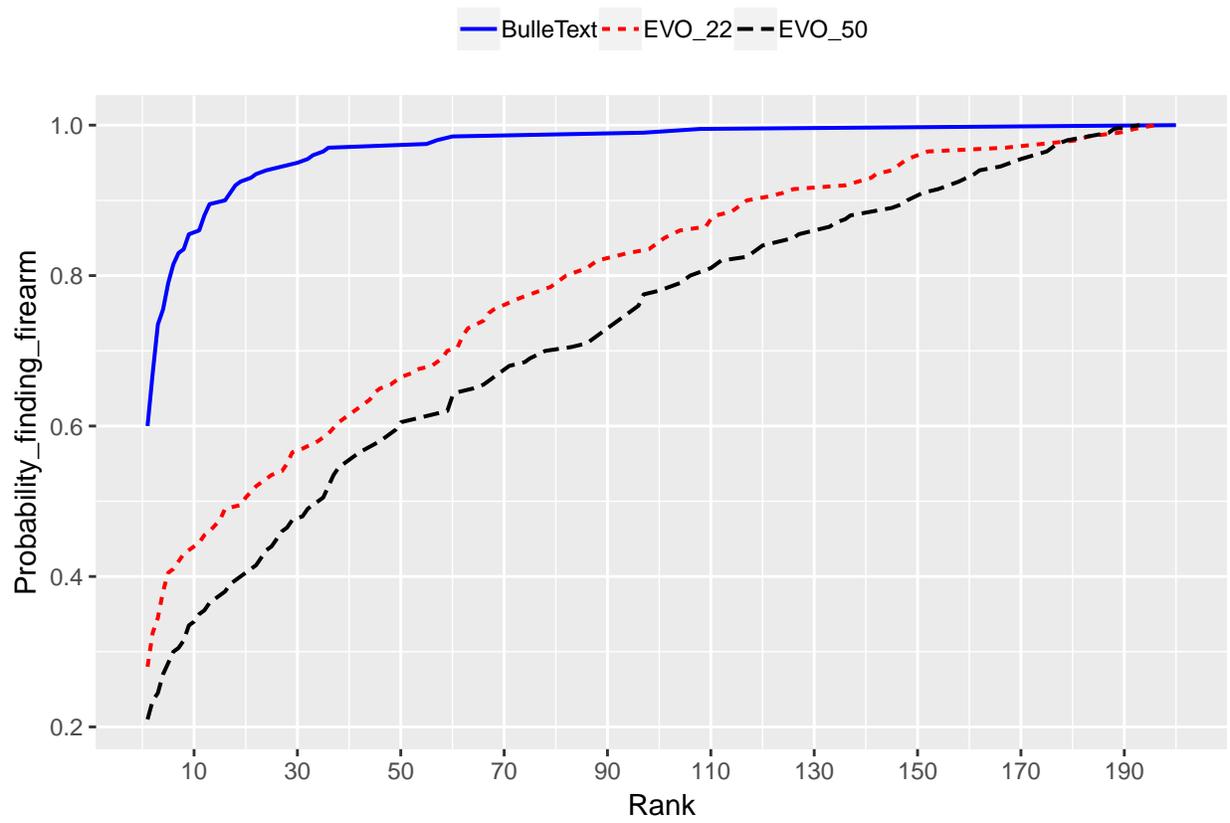


Figure 57: Courbes *CMC* obtenues par les systèmes *EVOFINDER* (deux variantes) et *BulleText* dans le cas *1VS345*. Taille de la base de données : 200

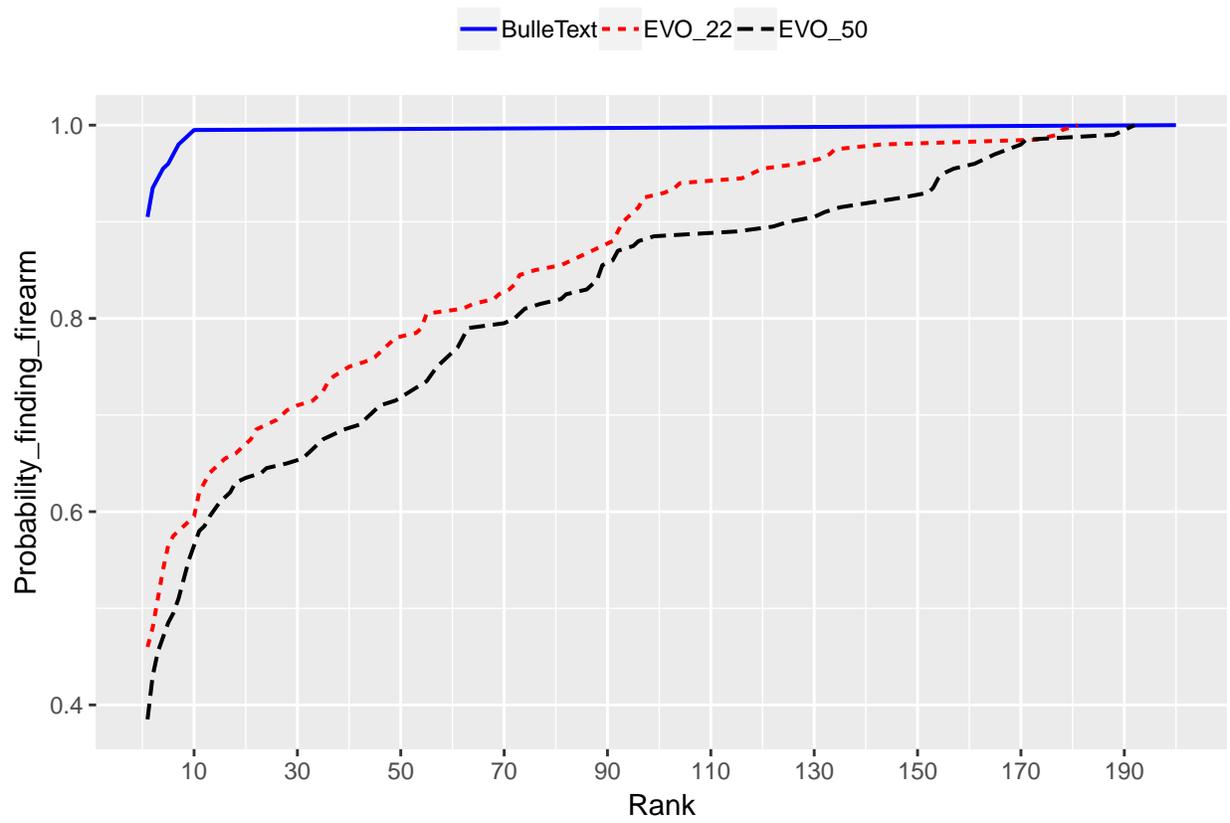


Figure 58: Courbes *CMC* obtenues par les systèmes *EVOFINDER* (deux variantes) et *BulleText* dans le cas *2VS345*. Taille de la base de données : 200

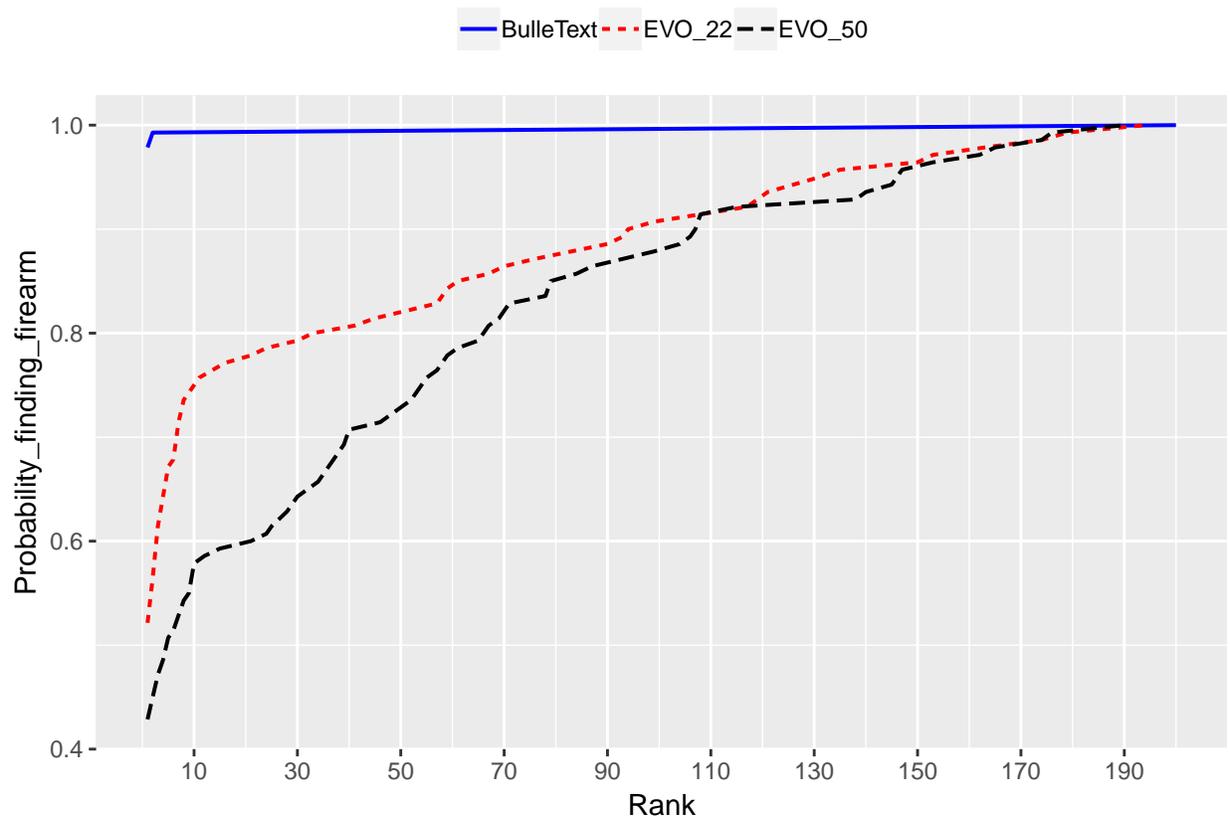


Figure 59: Courbes *CMC* obtenues par les systèmes *EVOFINDER* (deux variantes) et *BulleText* dans le cas *6VS345*. Taille de la base de données : 200

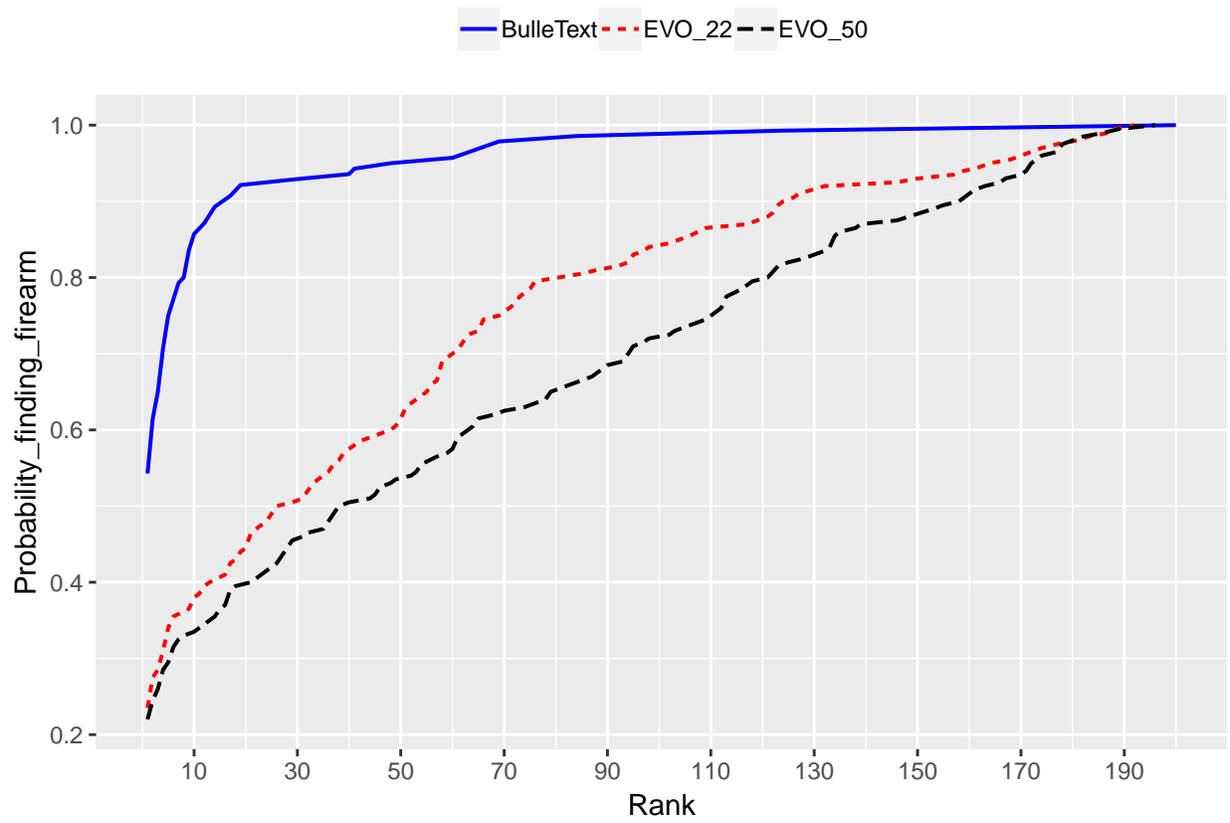


Figure 60: Courbes *CMC* obtenues par les systèmes *EVOFINDER* (deux variantes) et *BulleText* dans le cas *1VS456*. Taille de la base de données : 200

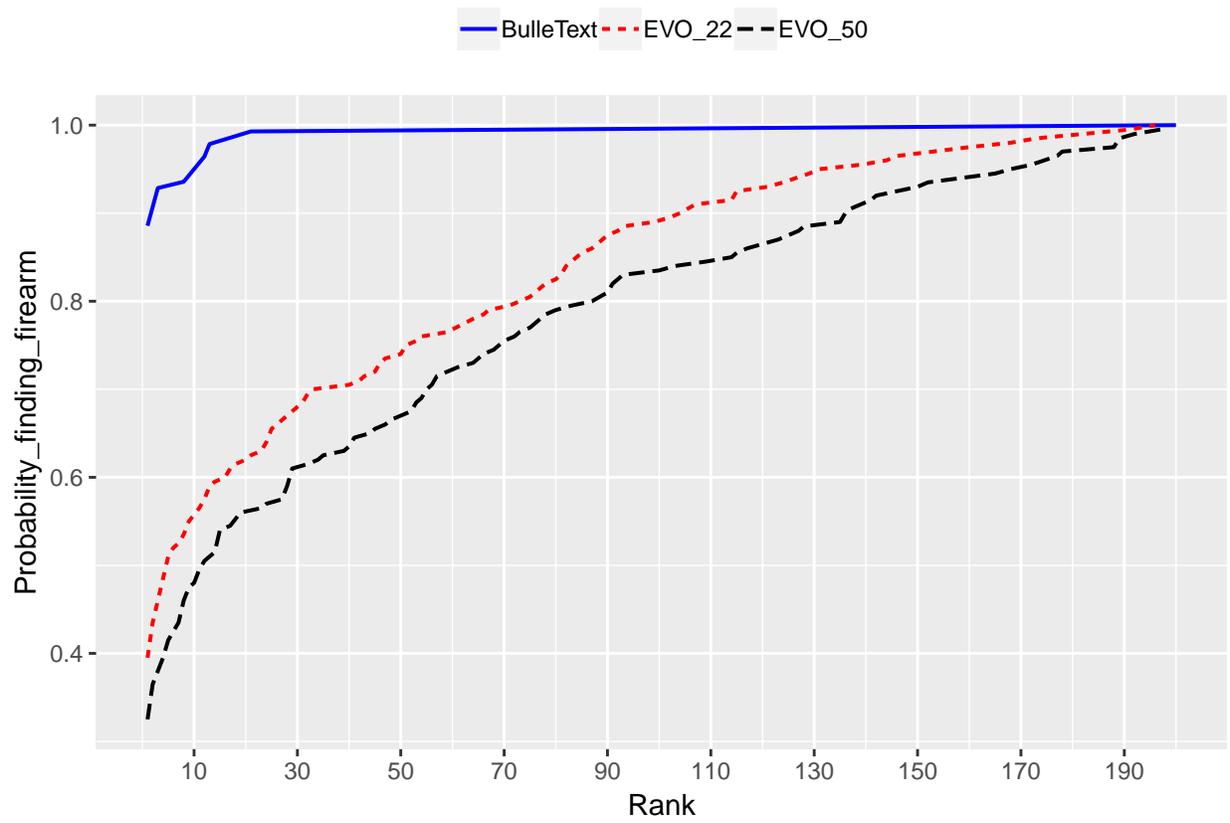


Figure 61: Courbes *CMC* obtenues par les systèmes *EVOFINDER* (deux variantes) et *BulleText* dans le cas *2VS456*. Taille de la base de données : 200

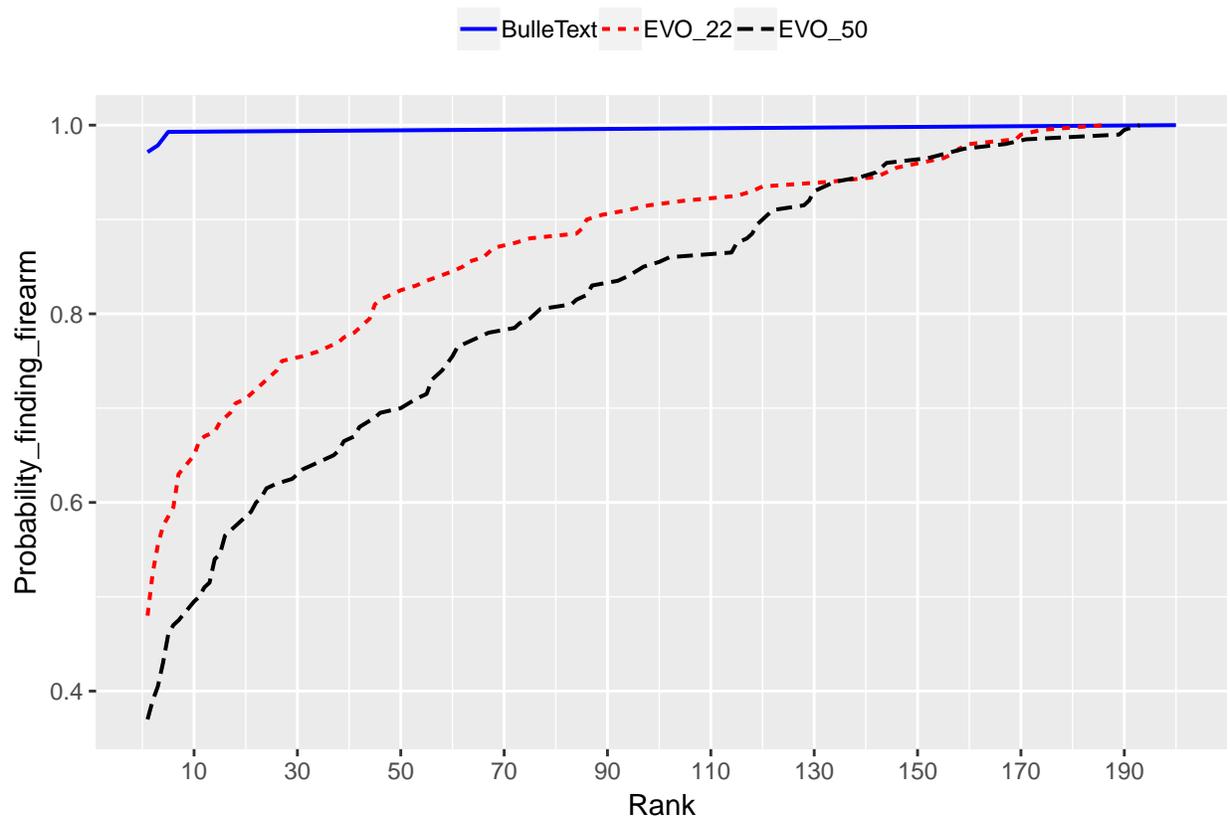


Figure 62: Courbes *CMC* obtenues par les systèmes *EVOFINDER* (deux variantes) et *BulleText* dans le cas *3VS456*. Taille de la base de données : 200

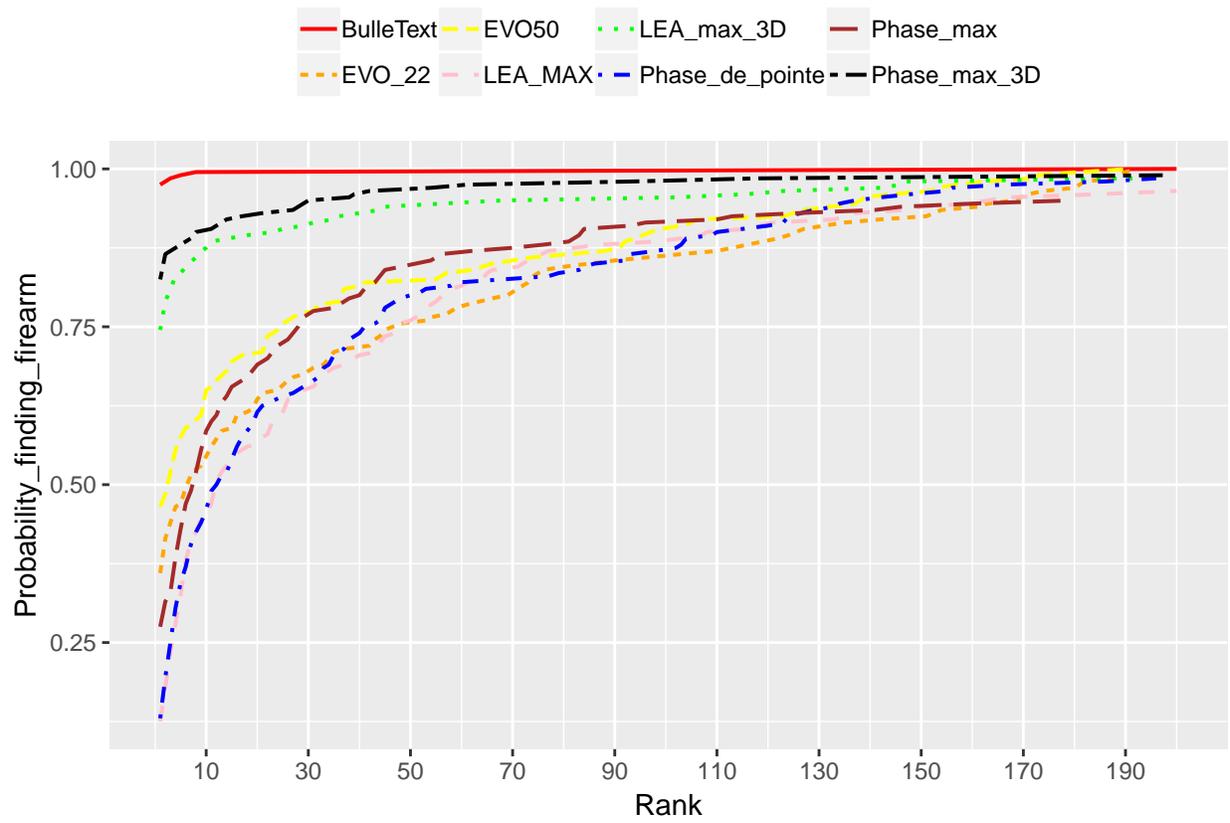


Figure 63: Courbes *CMC* obtenues par les systèmes *EVOFINDER* (deux variantes) et *BulleText* dans le cas *5VS1234*. Taille de la base de données : 200

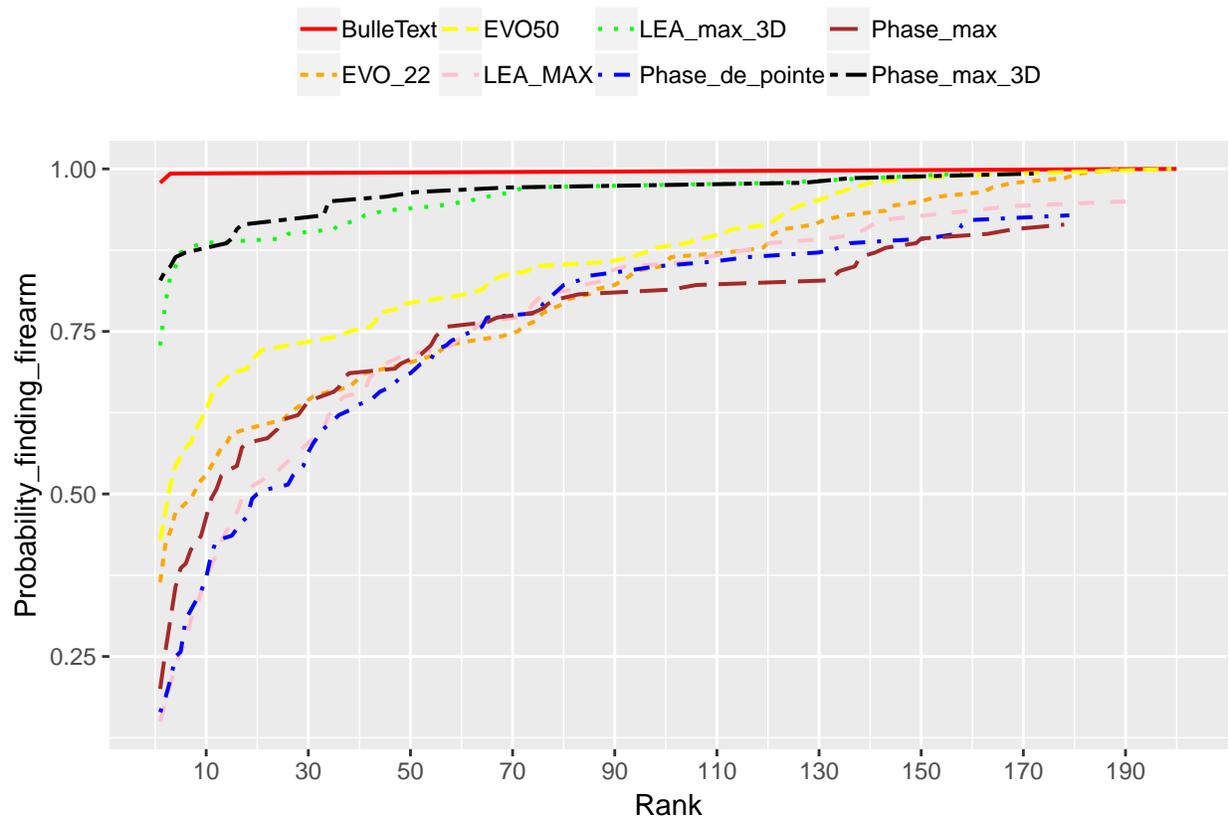


Figure 64: Courbes CMC obtenues par les systèmes *EVOFINDER* (deux variantes) et *BulleText* dans le cas *6VS1234*. Taille de la base de données : 200

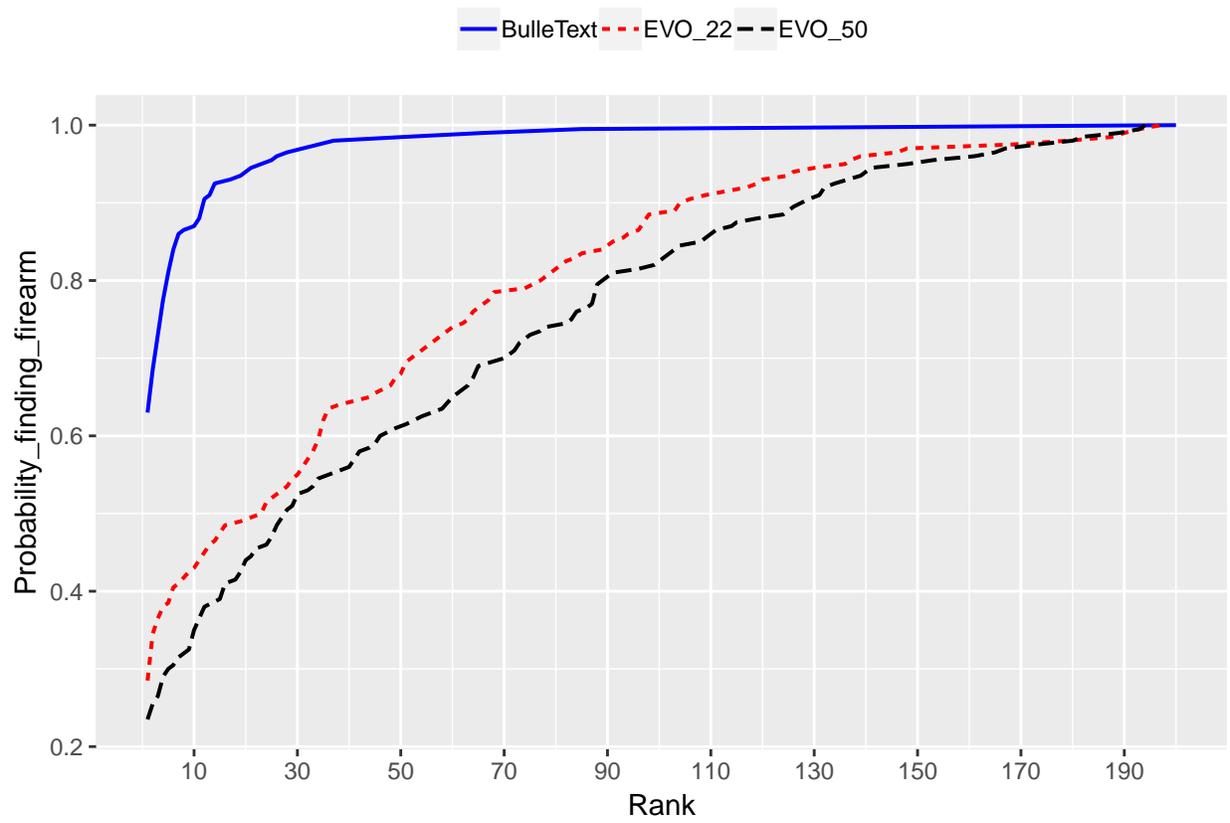


Figure 65: Courbes *CMC* obtenues par les systèmes *EVOFINDER* (deux variantes) et *BulleText* dans le cas *1VS2345*. Taille de la base de données : 200

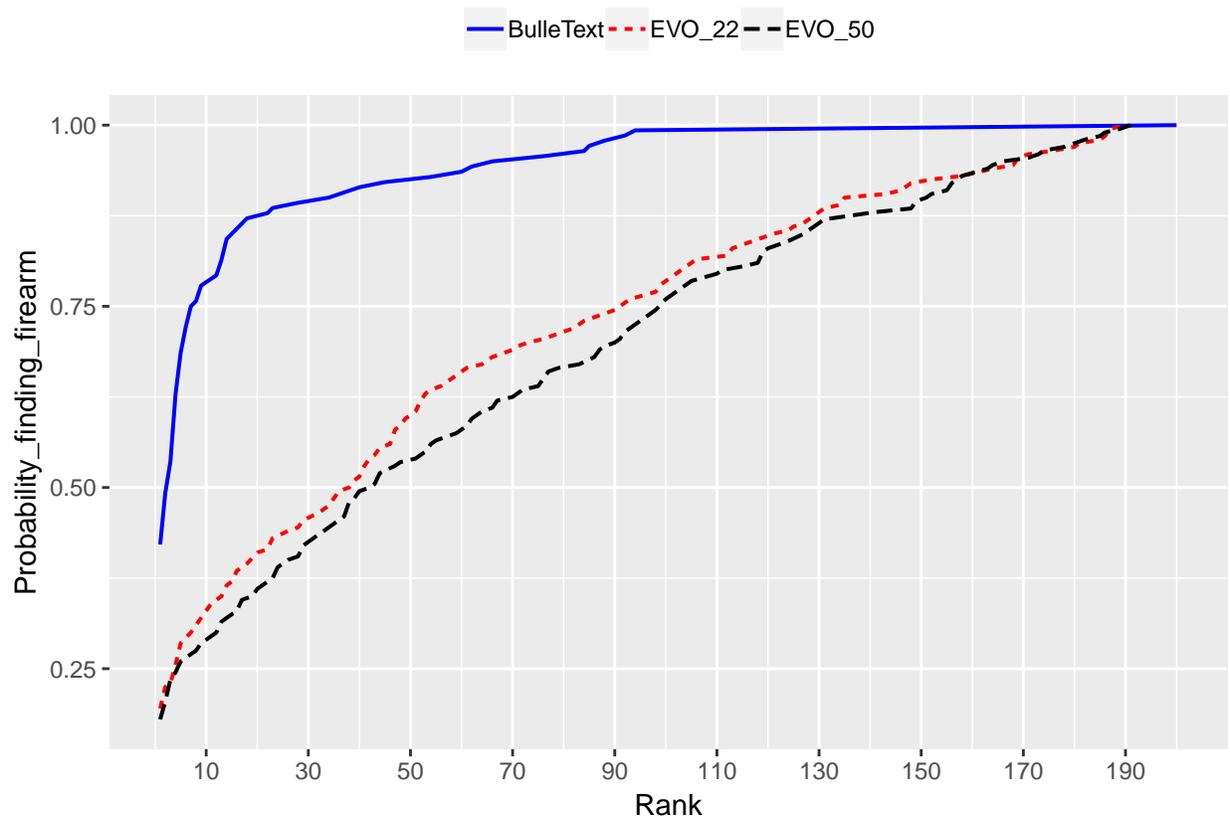


Figure 66: Courbes CMC obtenues par les systèmes *EVOFINDER* (deux variantes) et *BulleText* dans le cas 6VS2345. Taille de la base de données : 200

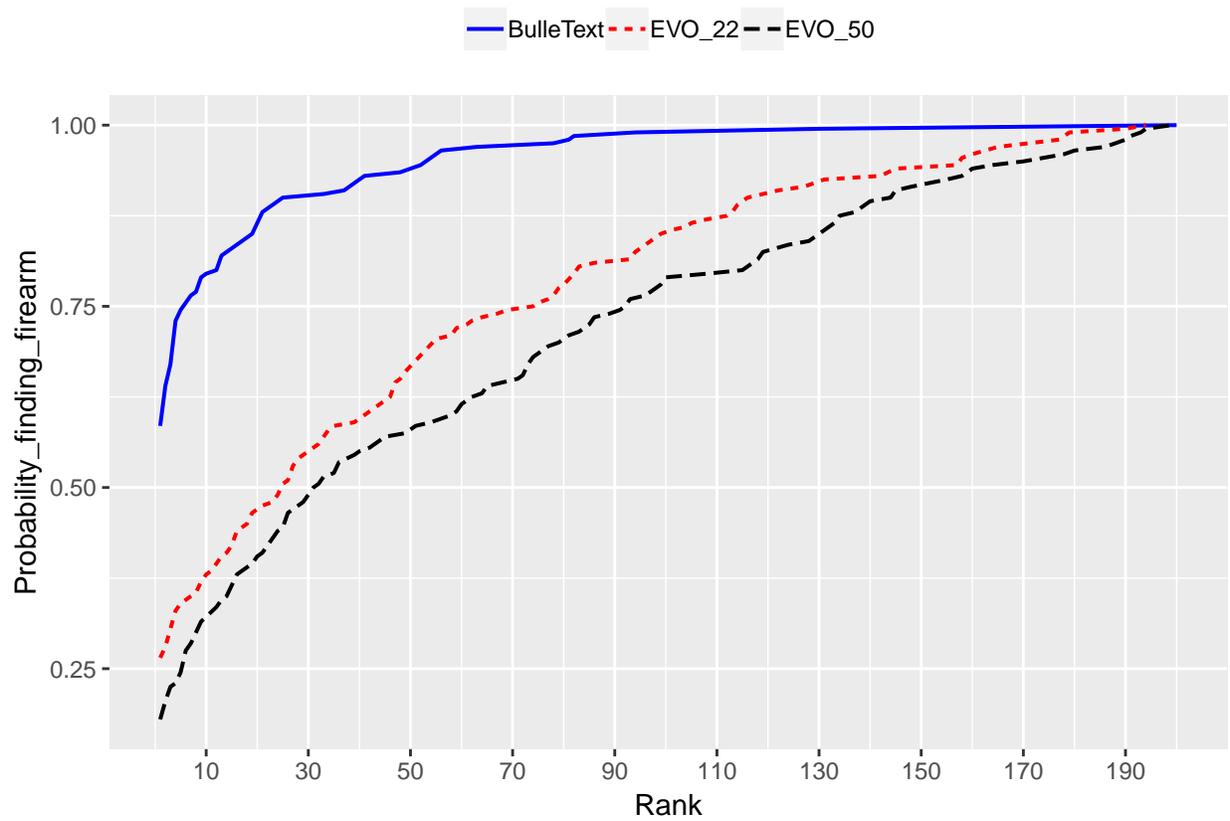


Figure 67: Courbes CMC obtenues par les systèmes *EVOFINDER* (deux variantes) et *BulleText* dans le cas 1VS3456. Taille de la base de données : 200

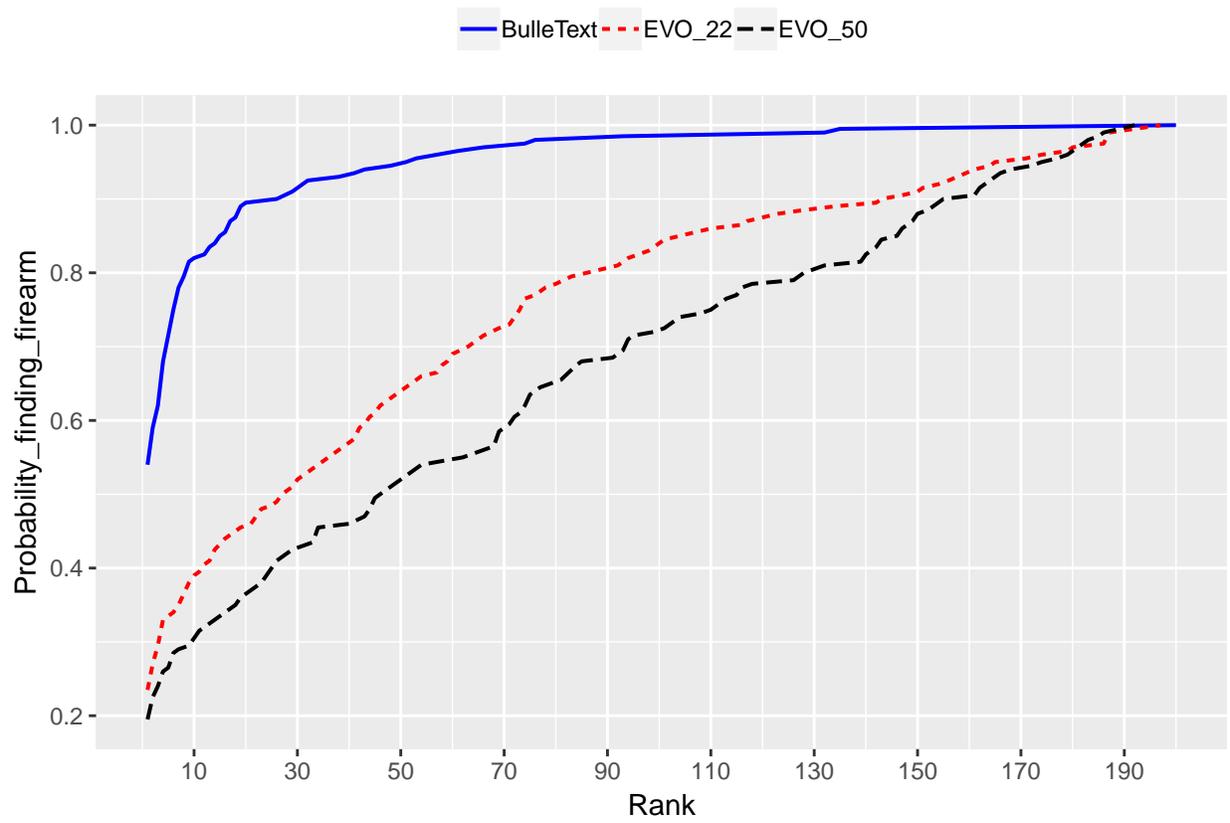


Figure 68: Courbes *CMC* obtenues par les systèmes *EVOFINDER* (deux variantes) et *BulleText* dans le cas *2VS3456*. Taille de la base de données : 200

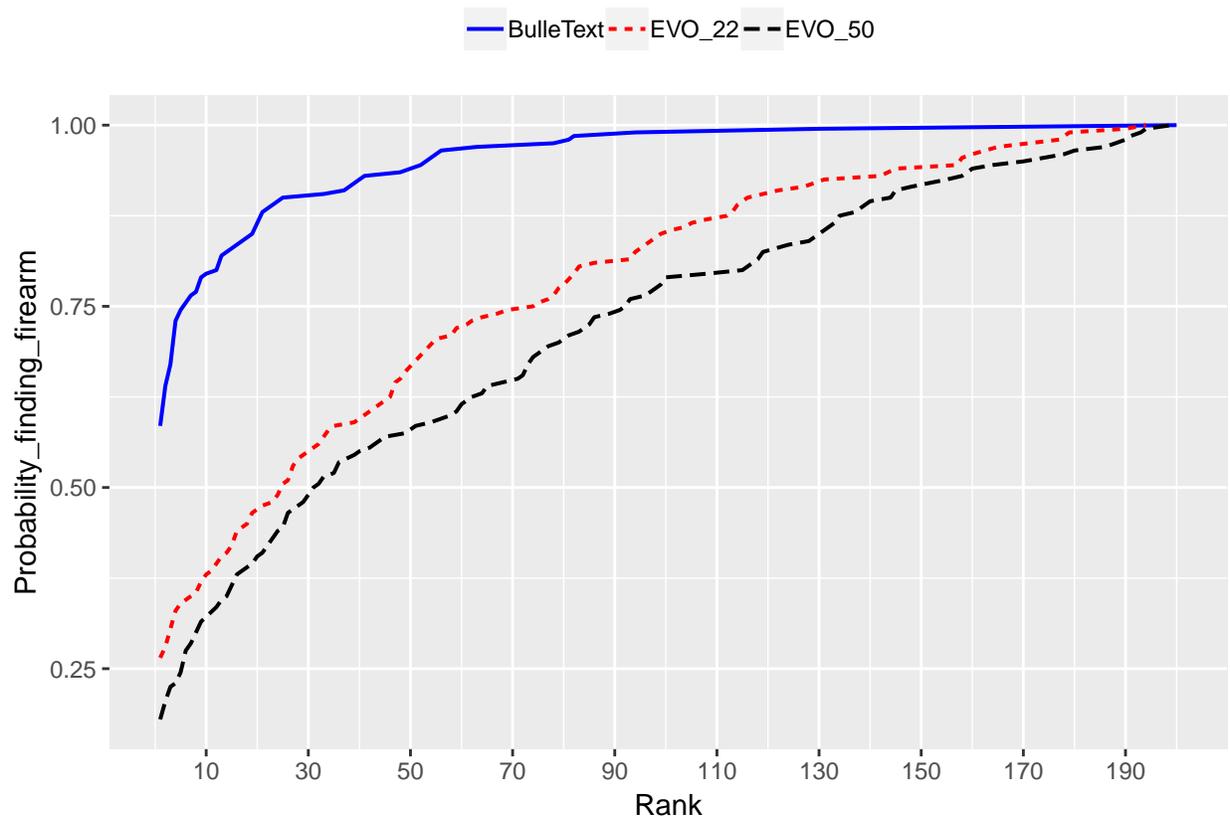


Figure 69: Courbes *CMC* obtenues par les systèmes *EVOFINDER* (deux variantes) et *BulleText* dans le cas *6VS12345*. Taille de la base de données : 200

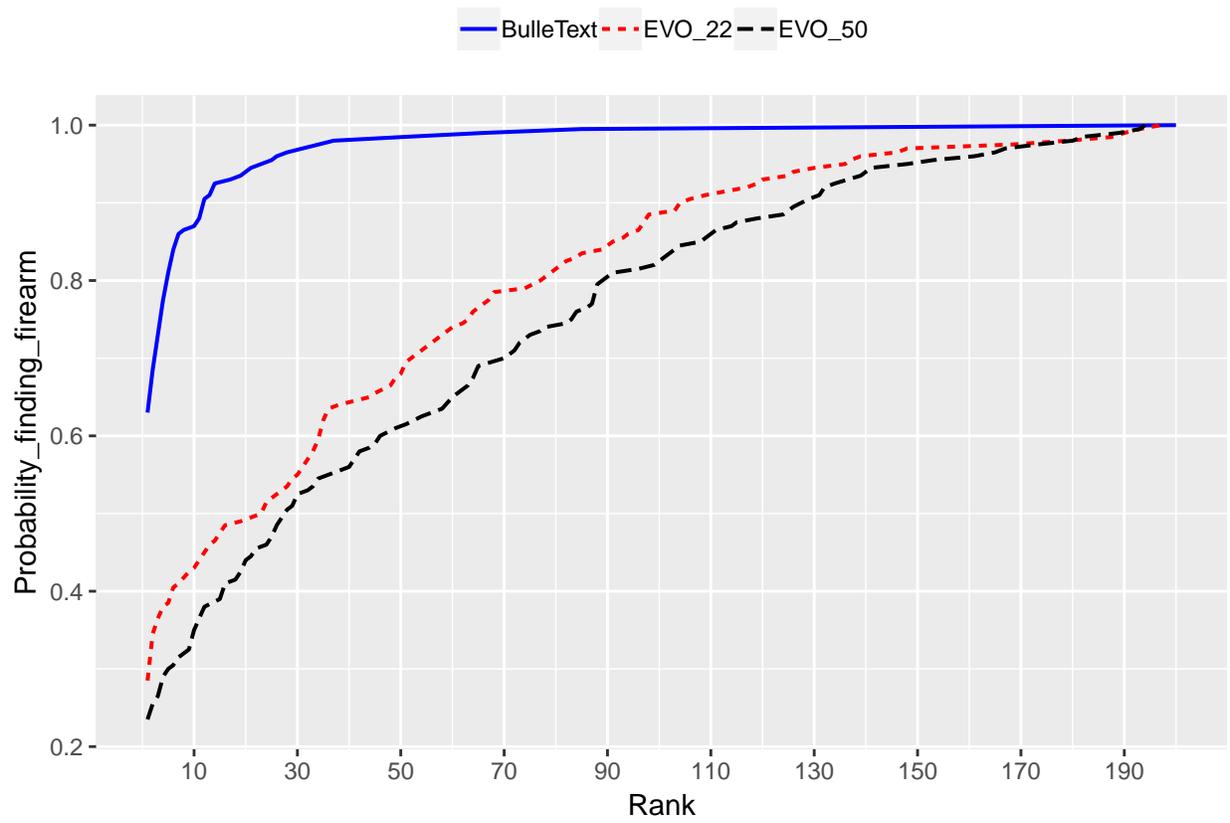


Figure 70: Courbes *CMC* obtenues par les systèmes *EVOFINDER* (deux variantes) et *BulleText* dans le cas *1VS23456*. Taille de la base de données : 200

## Annexe 2

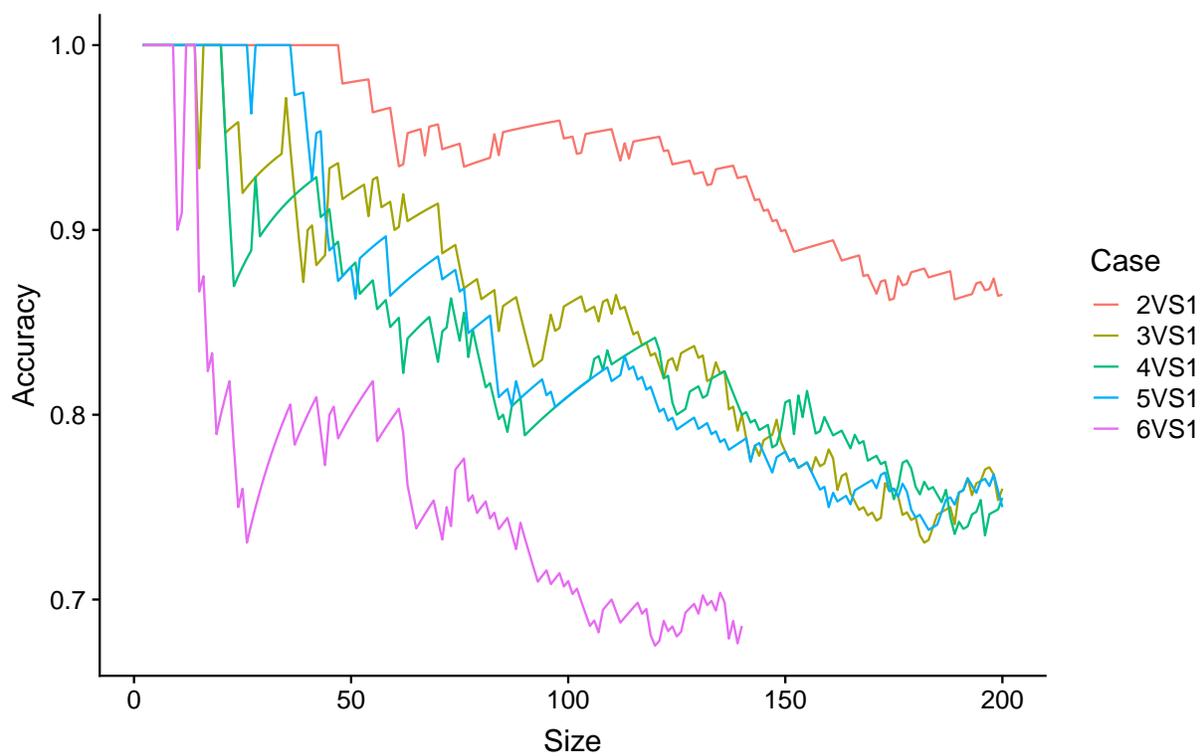


Figure 71: Configuration: *allVS1*. Évolution de la précision du système *BulleText* en fonction de la taille de la base de données.

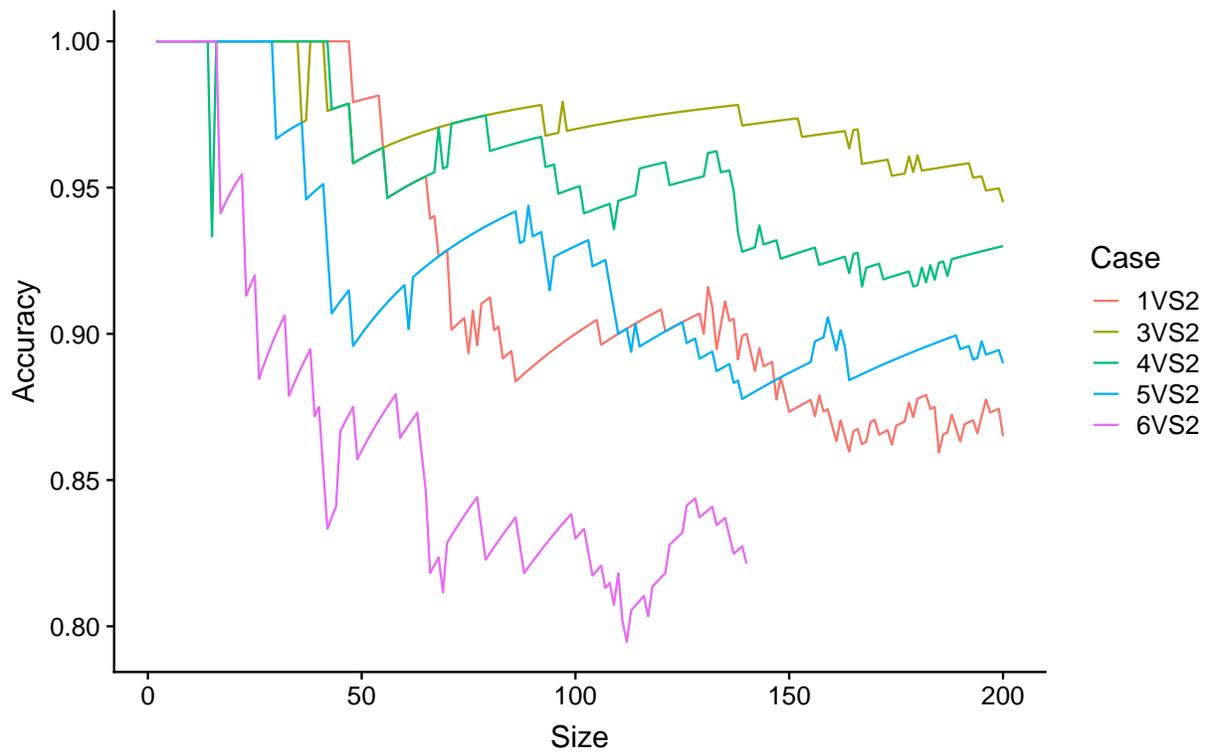


Figure 72: Configuration: *allVS2*. Évolution de la précision du système *BulleText* en fonction de la taille de la base de données.

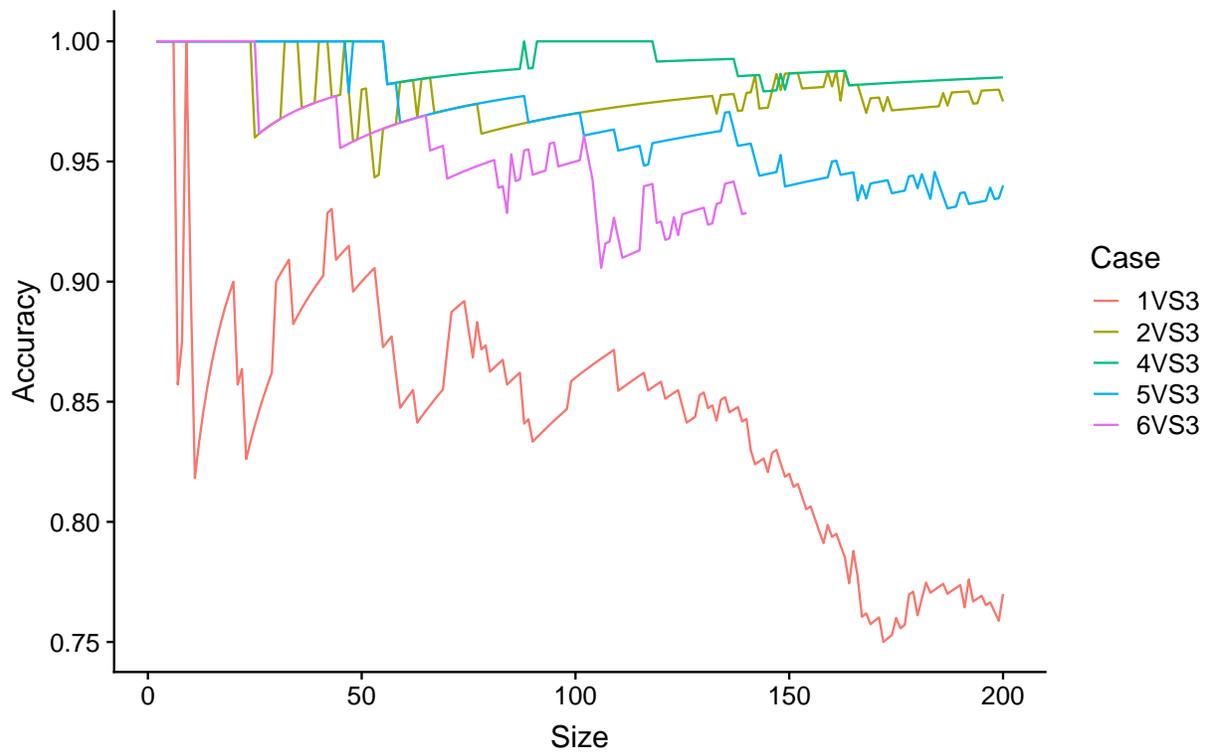


Figure 73: Configuration: *allVS3*. Évolution de la précision du système *BulleText* en fonction de la taille de la base de données.

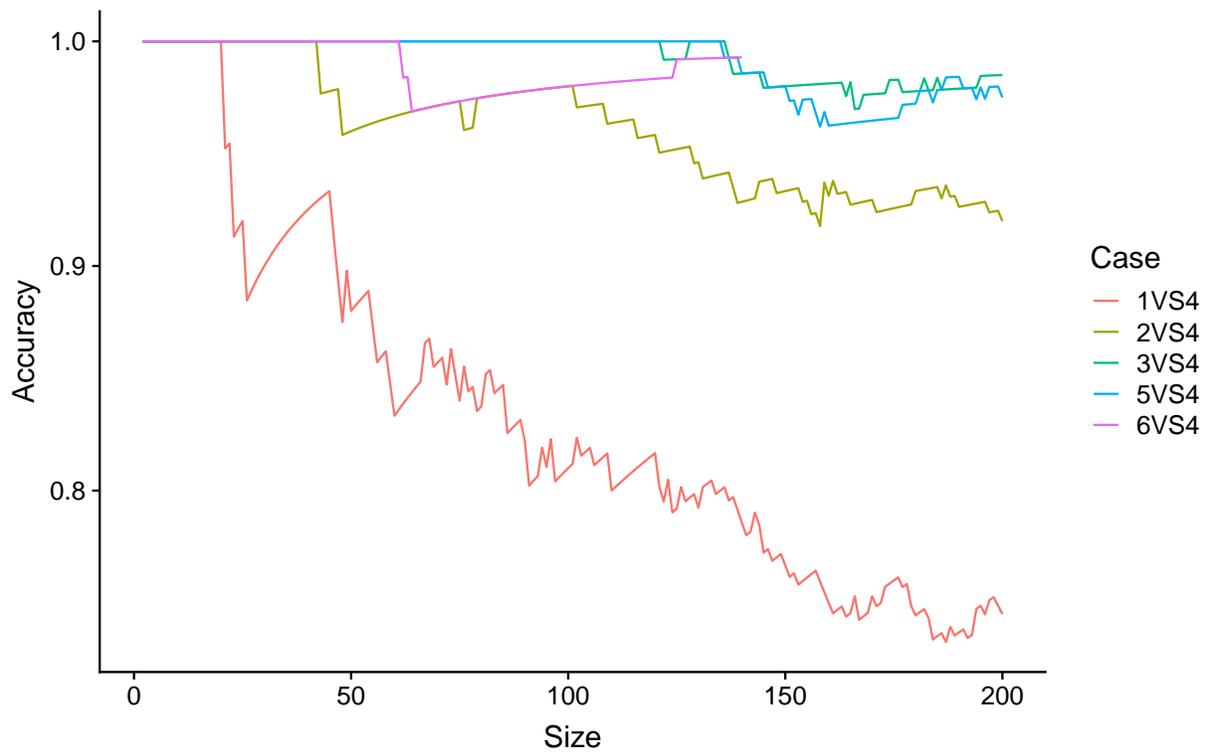


Figure 74: Configuration: *allVS4*. Évolution de la précision du système *BulleText* en fonction de la taille de la base de données.

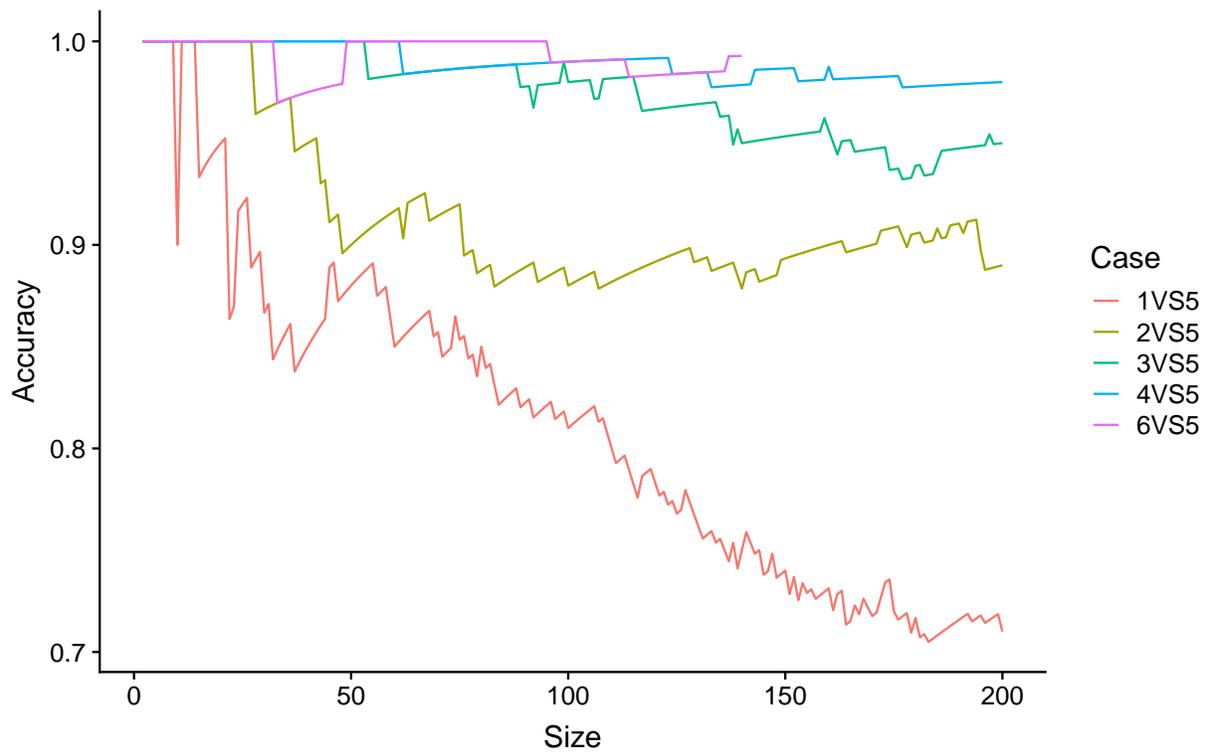


Figure 75: Configuration: *allVS5*. Évolution de la précision du système *BulleText* en fonction de la taille de la base de données.

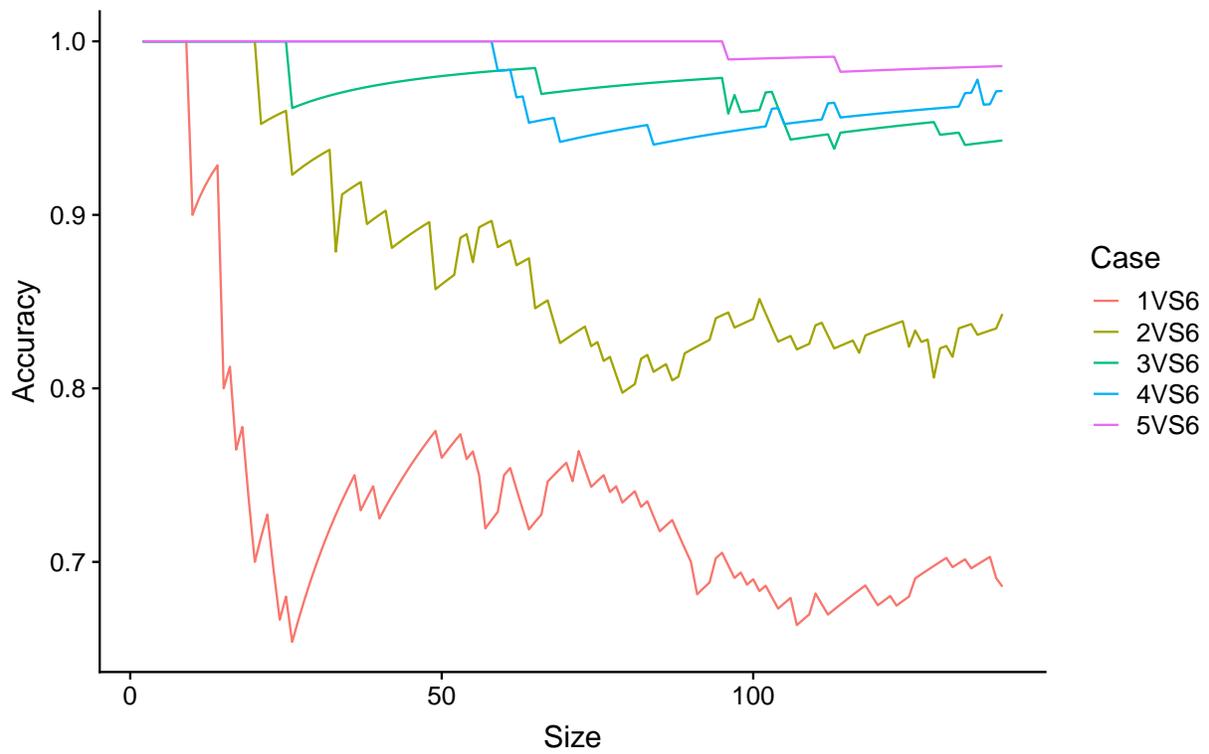


Figure 76: Configuration: *allVS6*. Évolution de la précision du système *BulleText* en fonction de la taille de la base de données.

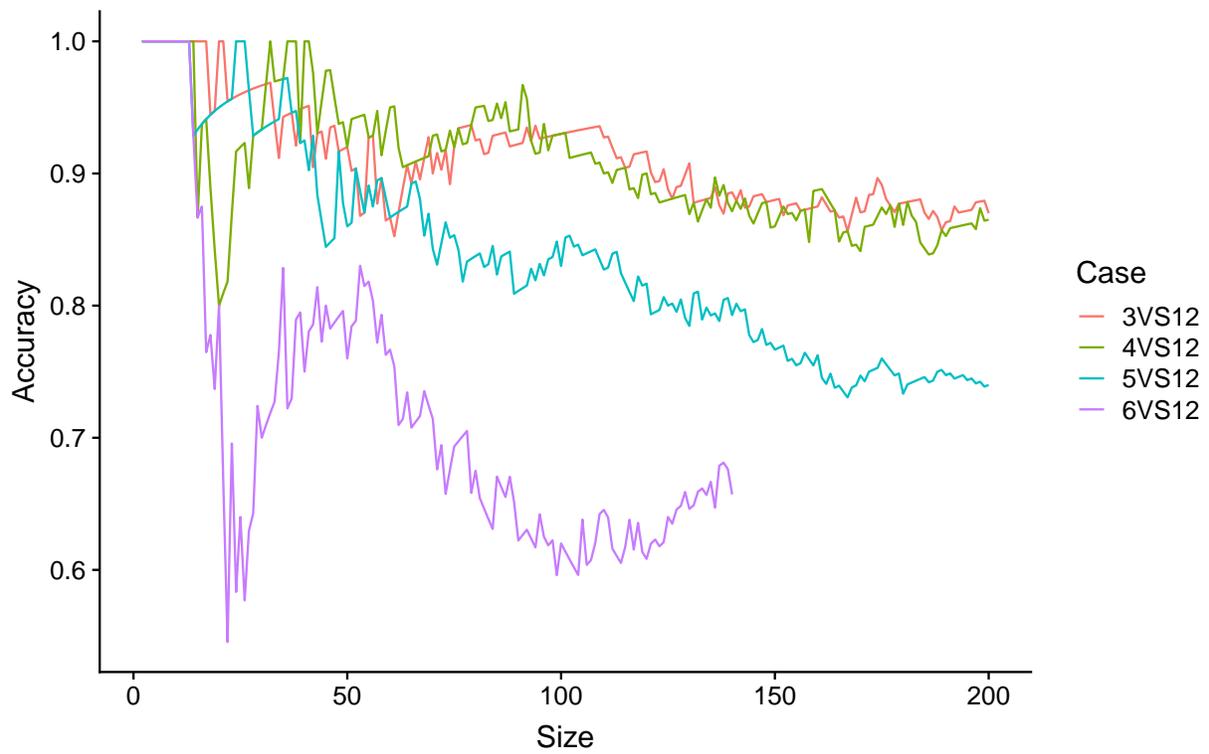


Figure 77: Configuration: *allVS12*. Évolution de la précision du système *BulleText* en fonction de la taille de la base de données.

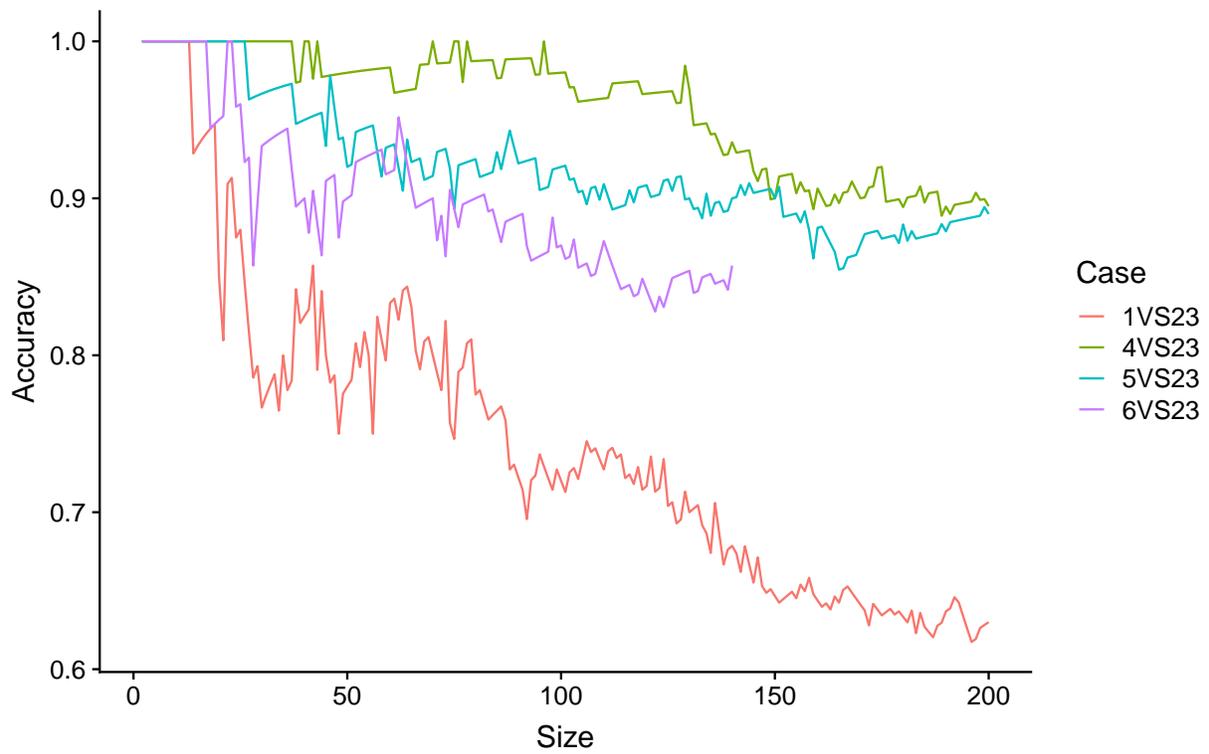


Figure 78: Configuration: *allVS23*. Évolution de la précision du système *BulleText* en fonction de la taille de la base de données.

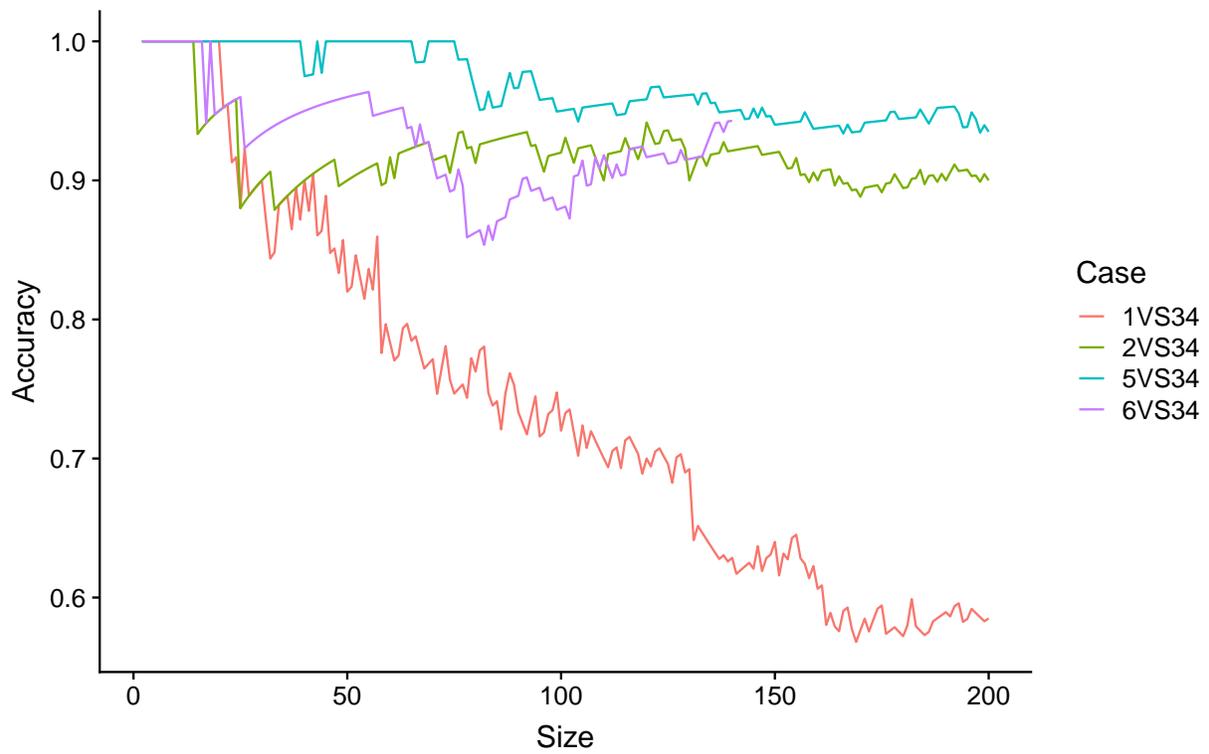


Figure 79: Configuration: *allVS34*. Évolution de la précision du système *BulleText* en fonction de la taille de la base de données.

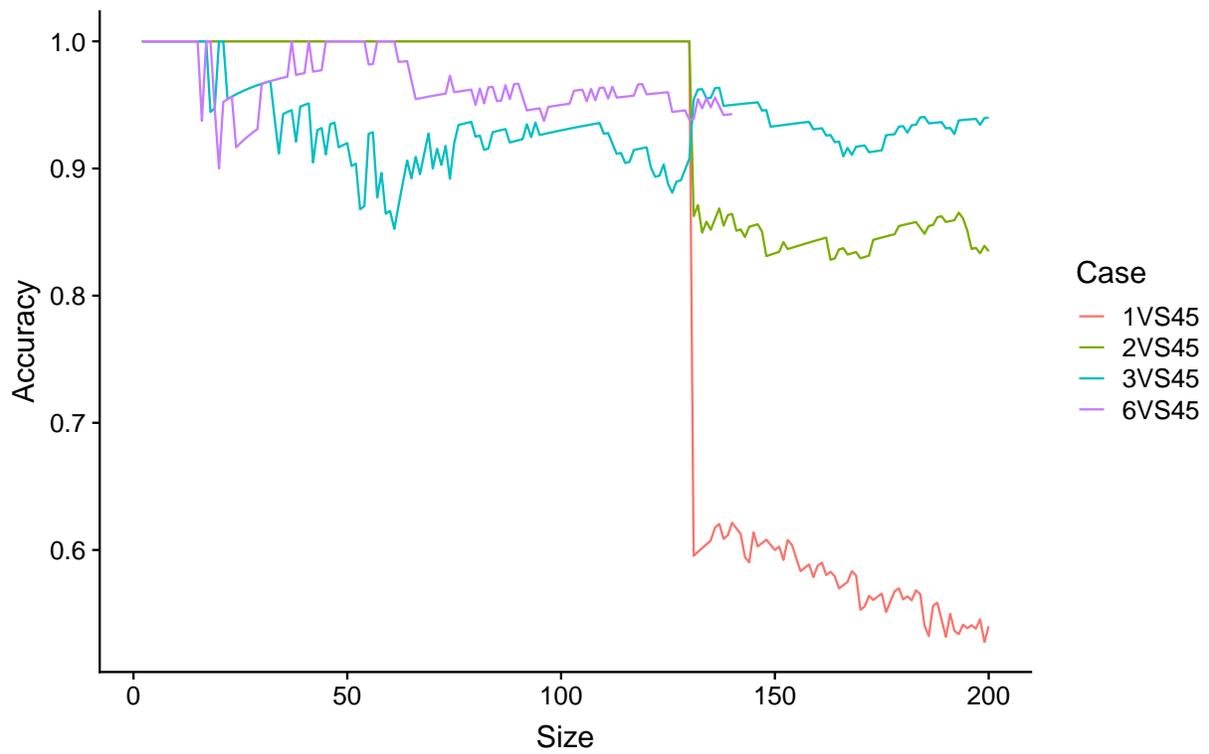


Figure 80: Configuration: *allVS45*. Évolution de la précision du système *BulleText* en fonction de la taille de la base de données.

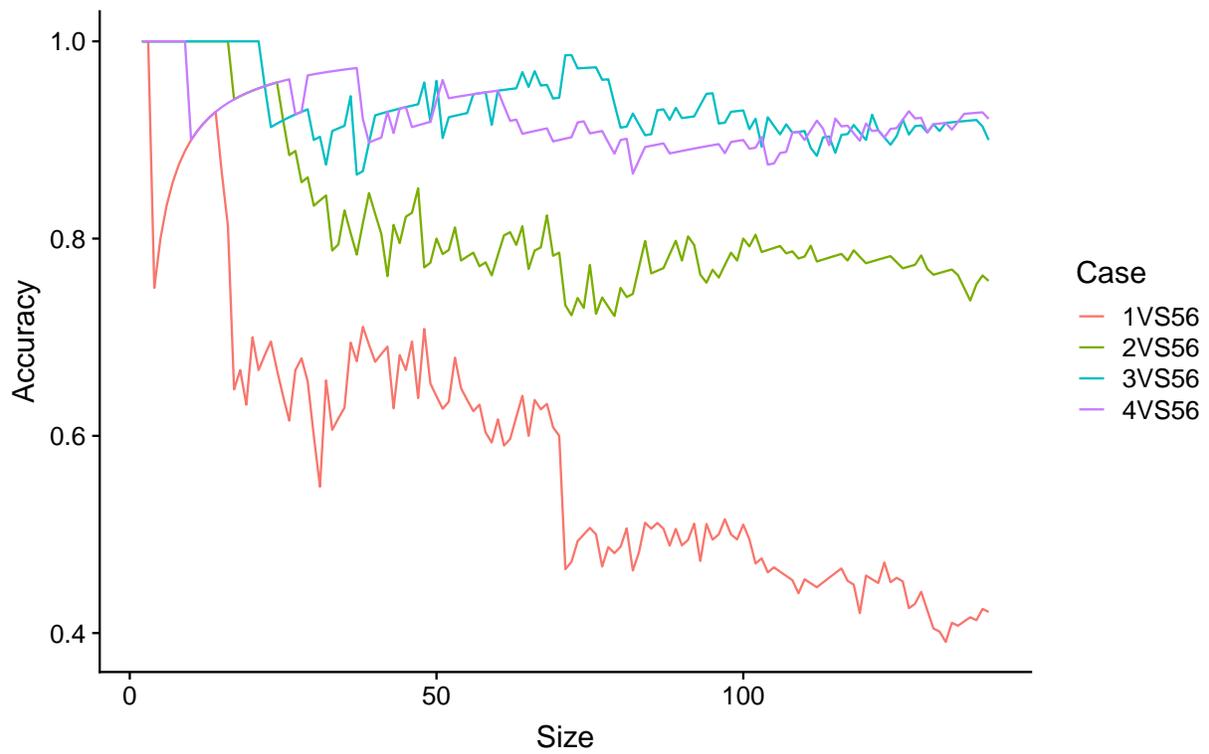


Figure 81: Configuration: *allVS56*. Évolution de la précision du système *BulleText* en fonction de la taille de la base de données.

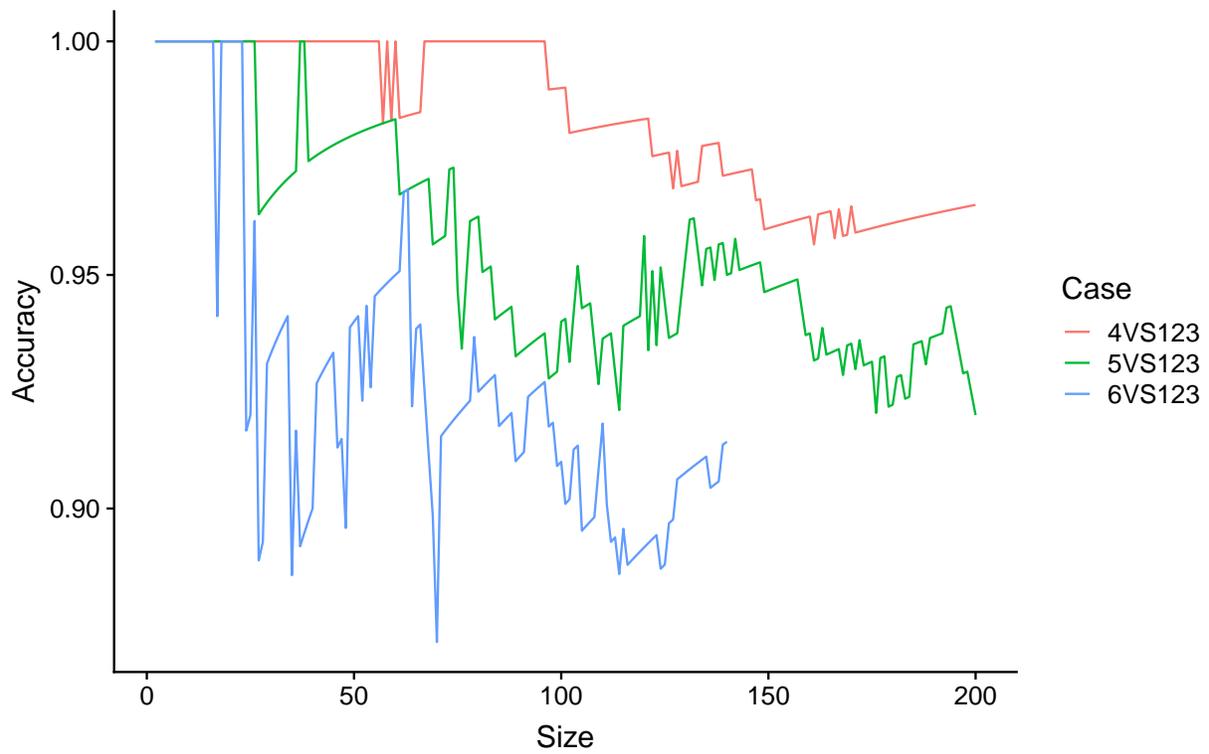


Figure 82: Configuration: *allVS123*. Évolution de la précision du système *BulleText* en fonction de la taille de la base de données.

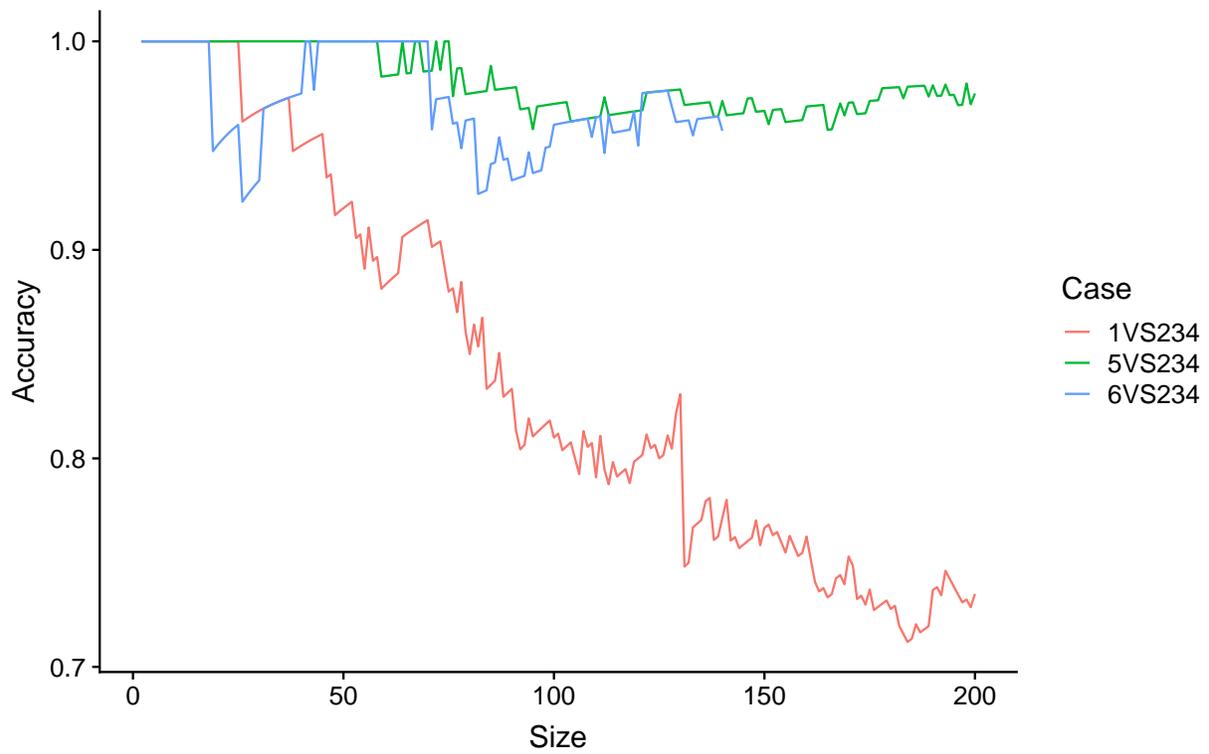


Figure 83: Configuration: *allVS234*. Évolution de la précision du système *BulleText* en fonction de la taille de la base de données.

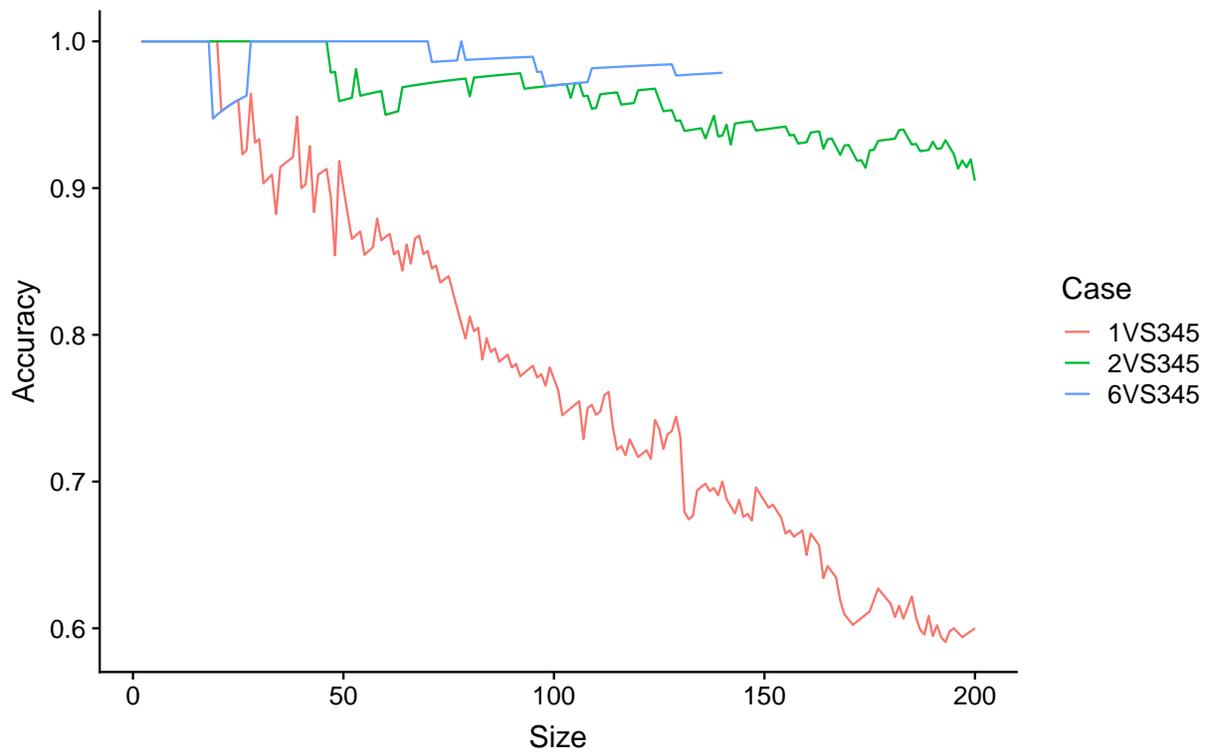


Figure 84: Configuration: *allVS345*. Évolution de la précision du système *BulleText* en fonction de la taille de la base de données.

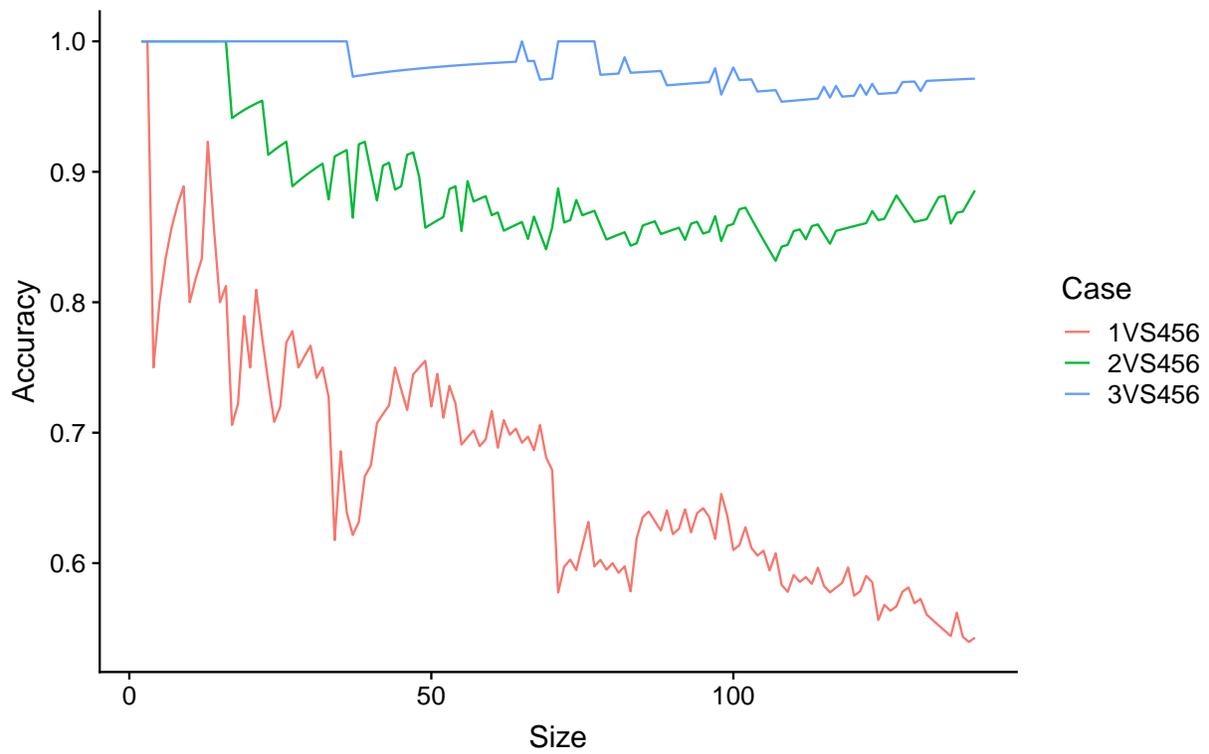


Figure 85: Configuration: *allVS456*. Évolution de la précision du système *BulleText* en fonction de la taille de la base de données.

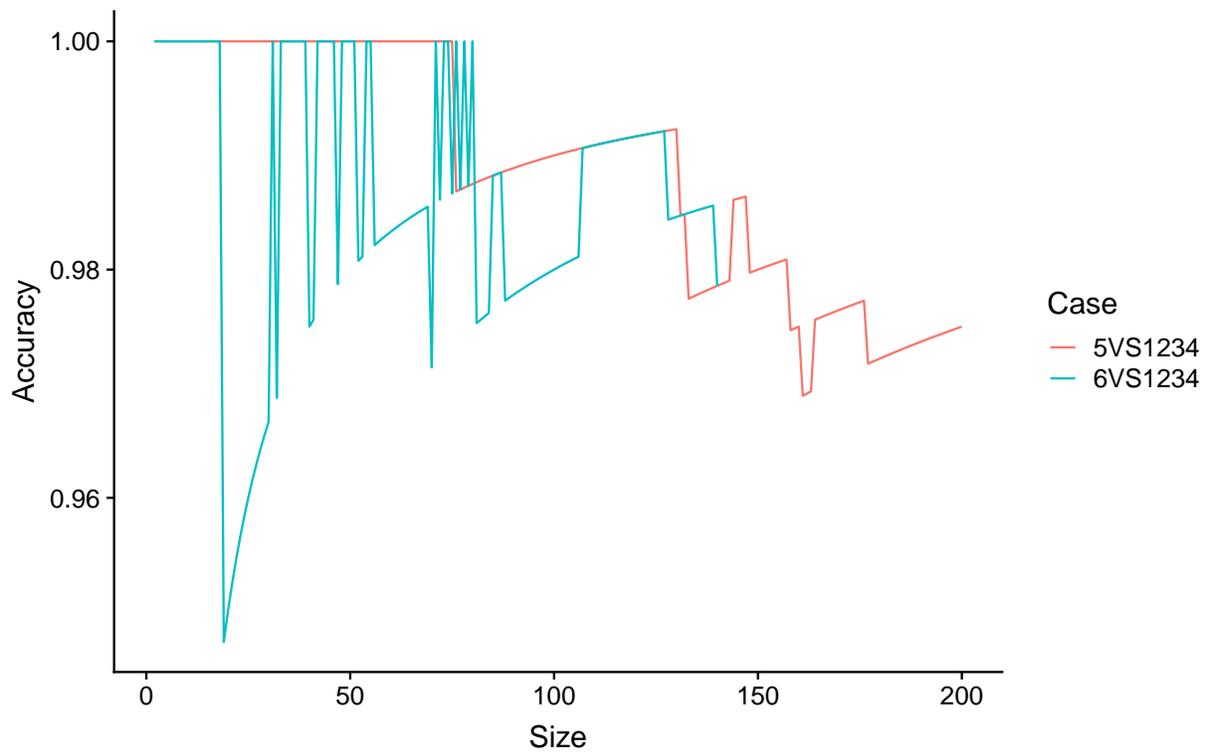


Figure 86: Configuration: *allVS1234*. Évolution de la précision du système *BulleText* en fonction de la taille de la base de données.

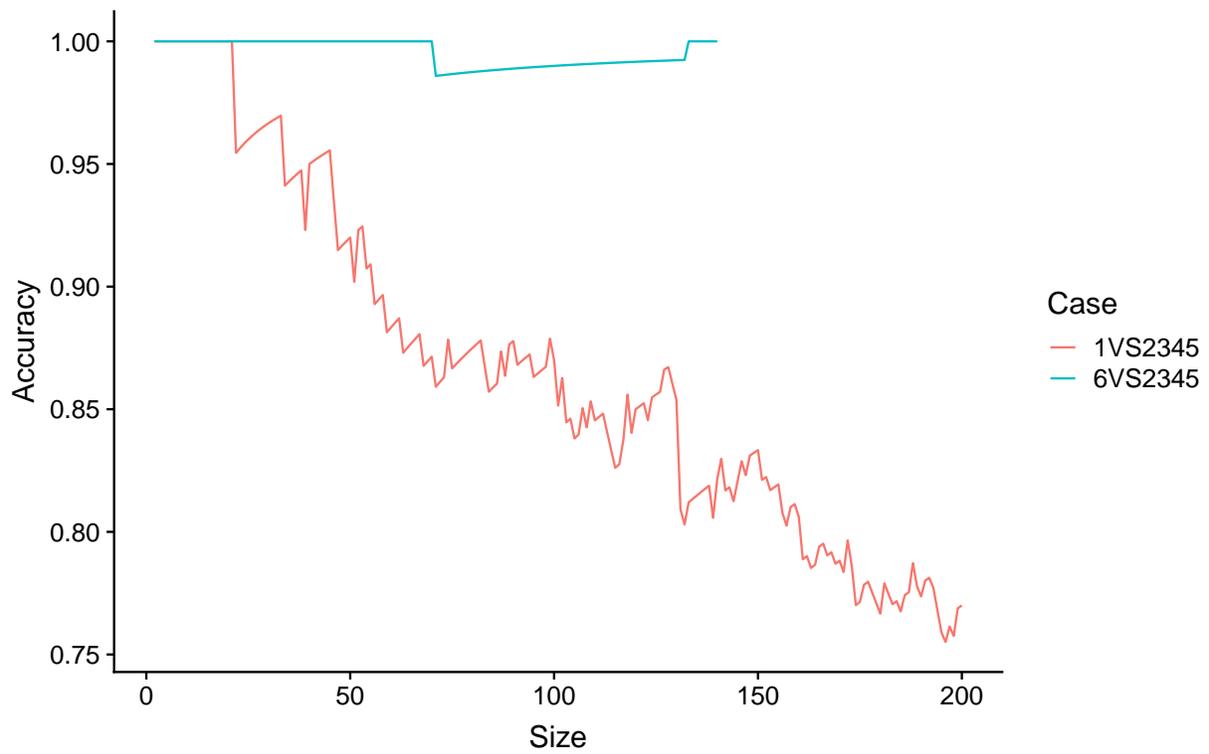


Figure 87: Configuration: *allVS2345*. Évolution de la précision du système *BulleText* en fonction de la taille de la base de données.

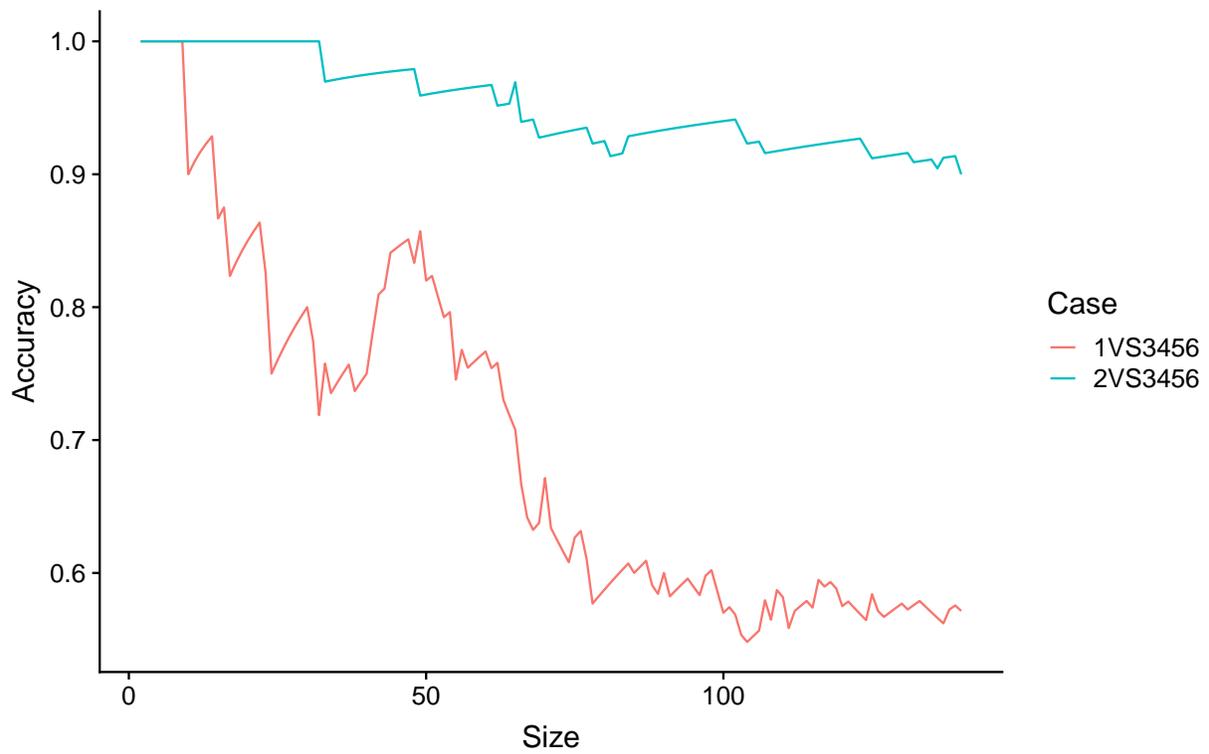


Figure 88: Configuration: *allVS3456*. Évolution de la précision du système *BulleText* en fonction de la taille de la base de données.

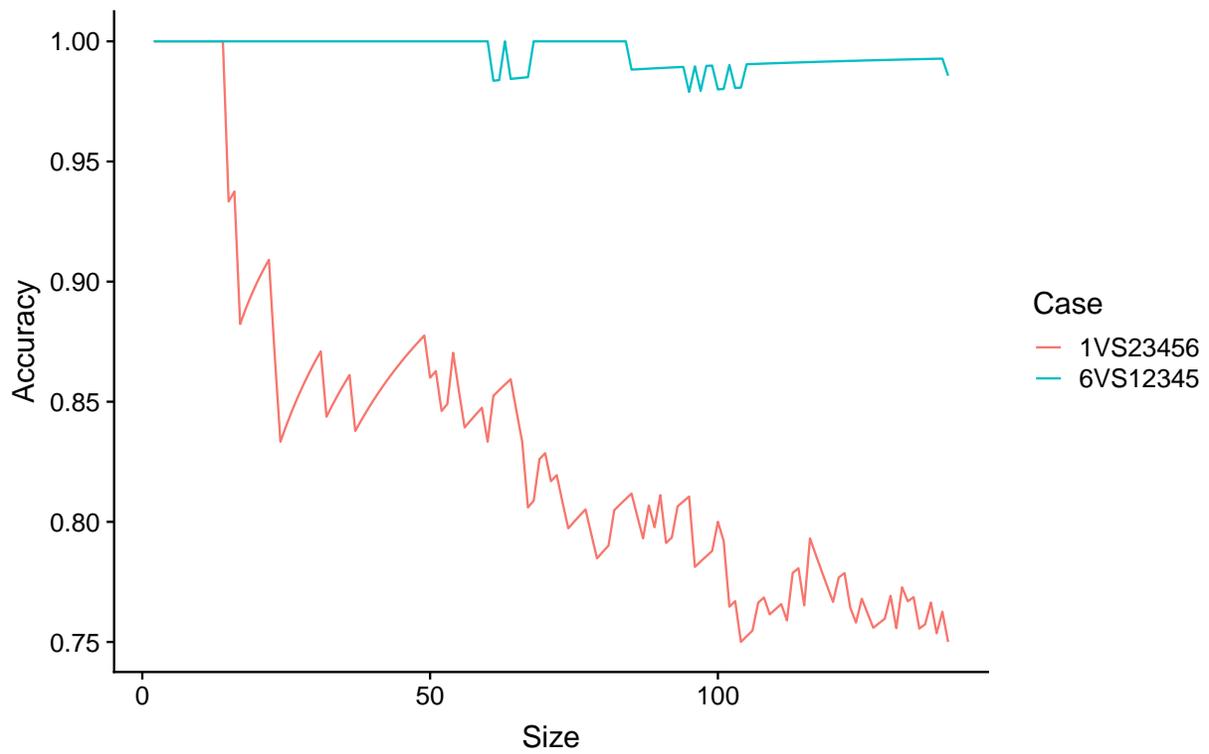


Figure 89: Configurations: *allVS12345* et *allVS23456*. Évolution de la précision du système *BulleText* en fonction de la taille de la base de données.

### Annexe 3

Table 1: Faux rapprochements générées par par *BulleText* pour le cas *2VS1 Projectile-Projectile*

Expected bullet	Rank	Predicted bullet
34	3	102
48	10	82
55	45	110
60	6	152
71	5	3
75	9	123
84	3	112
86	2	189
91	3	124
114	2	126
121	4	189
122	2	132
125	3	168
139	5	152
141	2	29
142	8	140
145	8	86
147	2	83
151	4	35
163	32	124
164	3	135
171	6	155
174	5	157
183	3	139
189	7	60
196	2	163
199	2	106

Table 2: Faux rapprochements générées par par *BulleText* pour le cas *3VS1 Projectile-Projectile*

Expected bullet	Rank	Predicted bullet
3	4	37
21	13	51
26	2	104
37	2	36
48	8	47
54	2	149
55	8	80
56	11	180
57	3	1
63	7	86
71	4	53
75	60	78
80	2	60

Expected bullet	Rank	Predicted bullet
84	16	112
90	10	81
91	2	42
110	71	81
114	4	126
117	2	132
119	2	40
120	4	196
121	3	80
125	24	38
127	4	133
131	2	42
137	5	135
138	2	50
139	15	135
141	7	29
142	79	146
147	13	122
150	4	199
151	4	35
153	5	79
158	2	157
161	2	157
162	3	164
163	12	94
164	112	74
165	3	39
166	78	78
167	22	185
171	25	58
179	3	159
180	3	179
183	38	61
196	4	82
199	3	123

Table 3: Faux rapprochements générées par par *BulleText* pour le cas *4VS1 Projectile-Projectile*

Expected bullet	Rank	Predicted bullet
21	5	5
23	6	41
26	5	63
31	2	44
43	3	34
46	4	45
48	41	68
55	4	80
56	6	47
59	4	125

Expected bullet	Rank	Predicted bullet
60	7	160
75	103	170
77	15	148
79	15	81
83	15	105
84	17	112
86	2	26
90	2	61
92	2	73
97	44	78
110	10	109
116	2	57
120	3	88
121	23	80
122	28	185
124	5	92
125	4	38
130	5	157
138	2	139
139	27	135
141	5	184
142	60	101
147	18	28
151	2	167
158	5	161
161	11	157
163	2	67
164	13	74
167	28	168
169	2	86
171	12	45
174	5	148
175	3	132
179	12	144
180	5	163
183	22	56
188	2	149
189	9	149
196	11	163

Table 4: Faux rapprochements générées par par *BulleText* pour le cas *5VS1 Projectile-Projectile*

Expected bullet	Rank	Predicted bullet
26	12	62
27	6	59
31	6	44
37	7	174
42	4	157
48	25	47

Expected bullet	Rank	Predicted bullet
55	2	110
56	40	155
59	6	27
60	2	118
69	3	97
70	4	98
75	103	170
76	16	17
77	93	98
83	5	78
84	78	112
86	2	21
89	18	90
97	12	102
110	27	109
114	4	38
116	65	192
117	3	193
120	12	97
121	3	160
123	5	118
125	6	4
129	2	199
130	14	37
137	6	164
139	23	62
142	122	146
145	20	157
147	2	75
151	11	103
153	14	67
156	4	189
159	9	134
160	5	70
161	16	80
163	6	180
171	2	45
174	8	200
179	5	144
183	17	182
190	2	197
194	2	170
196	12	15
199	4	175

Table 5: Faux rapprochements générées par par *BulleText* pour le cas *6VS1 Projectile-Projectile*

Expected bullet	Rank	Predicted bullet
63	2	87

Expected bullet	Rank	Predicted bullet
70	8	8
71	24	3
75	139	182
76	2	127
77	92	61
79	21	145
83	40	78
84	56	112
86	17	28
91	2	124
97	40	14
110	73	56
116	7	192
117	11	40
122	14	185
123	22	81
125	23	49
129	5	199
130	2	86
131	5	148
137	6	68
139	120	68
142	129	127
144	2	182
147	13	165
148	2	146
150	19	152
151	29	47
156	7	29
158	2	177
159	12	135
161	6	157
163	14	172
164	80	146
167	13	168
171	21	36
172	4	170
179	20	125
180	3	179
183	52	179
196	4	30
199	14	40

Table 6: Faux rapprochements générées par par *BulleText* pour le cas *1VS2 Projectile-Projectile*

Expected bullet	Rank	Predicted bullet
3	2	71
34	2	66
43	2	39

Expected bullet	Rank	Predicted bullet
48	9	36
55	104	200
56	3	47
60	8	103
63	4	157
71	9	54
75	9	14
83	7	147
86	11	39
91	2	166
104	2	106
122	3	83
139	9	115
142	10	75
145	5	106
147	2	28
148	2	127
151	5	22
160	2	157
163	42	196
174	2	163
189	3	13
199	5	89
200	2	60

Table 7: Faux rapprochements générées par par *BulleText* pour le cas *3VS2 Projectile-Projectile*

Expected bullet	Rank	Predicted bullet
42	14	153
48	3	47
93	9	103
139	2	136
145	3	12
148	2	135
164	39	30
167	11	84
174	2	121
196	2	82
200	17	176

Table 8: Faux rapprochements générées par par *BulleText* pour le cas *4VS2 Projectile-Projectile*

Expected bullet	Rank	Predicted bullet
43	14	45
48	2	52
87	8	191
93	2	24

Expected bullet	Rank	Predicted bullet
102	5	79
109	8	14
125	5	126
138	8	196
139	5	135
144	2	179
147	6	7
148	4	40
164	7	125
167	7	168

Table 9: Faux rapprochements générées par par *BulleText* pour le cas *5VS2 Projectile-Projectile*

Expected bullet	Rank	Predicted bullet
15	3	30
34	3	133
37	2	1
42	4	164
43	2	45
48	6	47
69	3	108
75	2	124
79	12	90
89	2	70
93	14	3
104	7	90
109	3	77
125	2	126
129	7	40
137	2	135
139	37	155
163	2	159
164	32	151
188	2	190
196	6	144
200	2	60

Table 10: Faux rapprochements générées par par *BulleText* pour le cas *6VS2 Projectile-Projectile*

Expected bullet	Rank	Predicted bullet
70	2	127
77	2	127
79	2	106
83	11	151
86	15	85
93	51	103
97	2	26

Expected bullet	Rank	Predicted bullet
101	2	91
102	12	91
109	8	47
114	6	126
119	8	37
125	4	48
126	2	124
129	39	40
130	5	45
131	2	161
136	3	163
138	3	197
139	21	103
145	2	103
147	6	67
148	3	127
150	2	45
163	2	55
164	118	151
167	4	84
171	2	165
189	5	55
196	4	144
200	4	89

Table 11: Faux rapprochements générées par par *BulleText* pour le cas *1VS3 Projectile-Projectile*

Expected bullet	Rank	Predicted bullet
3	4	57
21	22	184
23	2	2
38	4	125
42	3	131
48	8	76
54	3	57
55	16	106
56	8	144
57	2	198
60	3	80
63	5	186
75	82	49
80	2	121
84	7	177
90	8	40
110	96	93
114	2	100
119	3	193
123	2	173
125	19	124

Expected bullet	Rank	Predicted bullet
126	2	114
127	2	187
139	79	184
141	8	17
142	111	168
147	14	107
149	7	118
150	12	197
151	4	24
153	2	191
155	3	24
156	5	181
159	2	13
161	3	186
162	8	52
163	19	126
164	143	159
165	3	33
166	34	88
167	26	192
171	34	6
179	3	180
180	10	56
183	39	180
196	4	120

Table 12: Faux rapprochements générées par par *BulleText* pour le cas *2VS3 Projectile-Projectile*

Expected bullet	Rank	Predicted bullet
42	3	82
50	2	52
164	33	135
167	7	164
200	19	184

Table 13: Faux rapprochements générées par par *BulleText* pour le cas *4VS3 Projectile-Projectile*

Expected bullet	Rank	Predicted bullet
62	2	79
138	36	137
164	3	162

Table 14: Faux rapprochements générées par par *BulleText* pour le cas *5VS3 Projectile-Projectile*

Expected bullet	Rank	Predicted bullet
1	2	145
54	6	120
56	2	22
59	2	102
89	7	109
97	2	110
104	4	58
137	2	135
138	19	140
159	2	135
161	2	62
166	17	88

Table 15: Faux rapprochements générées par par *BulleText* pour le cas *6VS3 Projectile-Projectile*

Expected bullet	Rank	Predicted bullet
86	4	79
106	2	129
126	4	124
130	2	181
136	8	99
137	2	47
138	8	191
156	3	130
164	41	83
165	2	66
166	2	137
196	2	179

Table 16: Faux rapprochements générées par par *BulleText* pour le cas *1VS4 Projectile-Projectile*

Expected bullet	Rank	Predicted bullet
21	5	147
26	9	86
31	2	34
46	4	174
48	35	36
55	5	106
56	13	61
59	2	11
60	5	12
71	2	16
75	73	58
77	11	86

Expected bullet	Rank	Predicted bullet
79	14	63
80	2	121
83	75	177
84	23	192
86	2	66
90	3	149
97	47	82
104	4	106
110	36	171
112	3	113
121	19	14
122	32	106
124	3	185
125	4	59
130	9	103
137	5	144
139	152	187
140	6	142
141	7	145
142	91	164
147	16	8
150	4	147
151	2	2
153	4	145
156	2	184
158	7	191
159	2	17
161	14	186
163	4	20
164	23	68
165	2	200
167	12	177
169	2	156
171	17	13
175	3	199
179	41	180
180	15	117
183	29	196
189	4	188

Table 17: Faux rapprochements générées par par *BulleText* pour le cas *2VS4 Projectile-Projectile*

Expected bullet	Rank	Predicted bullet
42	2	131
43	7	152
48	10	125
86	2	188
93	2	196
102	9	177

Expected bullet	Rank	Predicted bullet
109	28	169
116	2	2
121	3	63
125	2	164
138	14	120
139	15	168
147	3	30
148	2	25
164	11	68
200	2	174

Table 18: Faux rapprochements générées par par *BulleText* pour le cas *3VS4 Projectile-Projectile*

Expected bullet	Rank	Predicted bullet
62	3	174
138	12	190
164	3	30

Table 19: Faux rapprochements générées par par *BulleText* pour le cas *5VS4 Projectile-Projectile*

Expected bullet	Rank	Predicted bullet
62	2	60
104	2	58
121	4	157
139	3	151
140	2	96

Table 20: Faux rapprochements générées par par *BulleText* pour le cas *6VS4 Projectile-Projectile*

Expected bullet	Rank	Predicted bullet
89	3	127
122	2	83
130	3	43

Table 21: Faux rapprochements générées par par *BulleText* pour le cas *1VS5 Projectile-Projectile*

Expected bullet	Rank	Predicted bullet
22	3	10
26	22	86
27	7	59
31	14	1

Expected bullet	Rank	Predicted bullet
37	8	59
40	3	33
42	5	107
45	2	43
48	36	95
55	2	200
56	43	110
59	4	27
60	3	34
63	2	127
69	5	32
70	2	160
71	3	10
75	59	147
77	100	147
83	11	2
84	45	125
89	8	117
97	63	69
109	4	110
110	47	156
114	4	122
116	13	73
120	6	73
121	4	92
123	2	131
125	9	93
129	4	26
130	9	123
134	7	159
137	11	135
139	75	185
141	6	107
142	159	165
144	13	175
145	8	106
150	2	20
151	14	12
153	13	149
155	2	56
156	9	140
158	2	177
159	11	140
160	6	121
161	75	186
163	7	20
164	12	68
165	2	200
178	2	193
179	3	180
183	50	180
193	2	89

Expected bullet	Rank	Predicted bullet
195	2	200
196	20	193

Table 22: Faux rapprochements générées par par *BulleText* pour le cas *2VS5 Projectile-Projectile*

Expected bullet	Rank	Predicted bullet
27	4	28
37	4	165
40	4	133
42	5	78
43	6	130
45	3	43
48	23	4
69	2	32
75	2	83
79	6	81
89	2	100
93	3	32
107	3	85
109	2	185
129	2	128
137	2	135
139	66	179
142	3	108
158	2	177
164	35	136
195	3	129
196	3	32

Table 23: Faux rapprochements générées par par *BulleText* pour le cas *3VS5 Projectile-Projectile*

Expected bullet	Rank	Predicted bullet
27	2	28
42	2	152
56	2	100
104	2	58
116	4	106
137	5	82
138	21	190
158	2	177
161	6	67
166	7	78

Table 24: Faux rapprochements générées par par *BulleText* pour le cas *4VS5 Projectile-Projectile*

Expected bullet	Rank	Predicted bullet
62	6	200
121	3	162
124	2	126
158	3	177

Table 25: Faux rapprochements générées par par *BulleText* pour le cas *6VS5 Projectile-Projectile*

Expected bullet	Rank	Predicted bullet
156	7	150
174	5	89

Table 26: Faux rapprochements générées par par *BulleText* pour le cas *1VS6 Projectile-Projectile*

Expected bullet	Rank	Predicted bullet
70	19	190
71	4	72
75	54	114
77	67	98
79	23	130
80	4	157
83	50	73
84	62	118
86	8	156
97	53	72
100	3	180
110	36	180
115	2	199
116	7	120
117	2	104
122	3	147
123	18	71
124	2	91
125	23	118
129	4	106
134	2	132
137	35	149
139	136	185
142	118	126
144	3	180
145	2	149
147	3	184
148	3	131
150	10	143
151	47	82

Expected bullet	Rank	Predicted bullet
153	2	200
156	14	81
159	21	175
161	3	200
163	10	114
164	72	136
167	2	160
171	8	114
172	9	163
179	56	144
180	10	196
183	43	158
196	2	190
199	12	150

Table 27: Faux rapprochements générées par par *BulleText* pour le cas *2VS6 Projectile-Projectile*

Expected bullet	Rank	Predicted bullet
79	12	81
86	17	63
93	6	193
101	3	108
102	4	190
109	3	103
114	3	132
119	12	71
120	2	125
126	2	114
129	19	200
135	2	137
136	2	68
138	6	196
139	39	66
144	2	196
147	3	173
158	2	177
163	4	136
164	94	136
167	2	93
172	2	170

Table 28: Faux rapprochements générées par par *BulleText* pour le cas *3VS6 Projectile-Projectile*

Expected bullet	Rank	Predicted bullet
66	2	165
86	2	63
126	5	166

Expected bullet	Rank	Predicted bullet
136	2	191
138	3	196
156	2	141
164	20	184
166	3	78

Table 29: Faux rapprochements générées par par *BulleText* pour le cas *4VS6 Projectile-Projectile*

Expected bullet	Rank	Predicted bullet
99	2	129
119	2	61
121	4	188
122	4	115

Table 30: Faux rapprochements générées par par *BulleText* pour le cas *5VS6 Projectile-Projectile*

Expected bullet	Rank	Predicted bullet
156	6	169
174	2	188

Table 31: Faux rapprochements générées par par *BulleText* pour le cas *3VS12*

Expected_firearm	LR_Expected	Predicted_firearm	LR_Predicted	Rank
21	0.161	7	66.028	8
33	0.005	125	60.836	22
42	57.025	131	61.738	2
48	0.107	47	66.334	9
54	5.016	130	66.313	4
57	29.539	3	65.916	4
84	41.505	113	65.977	3
86	13.941	43	66.155	5
109	65.749	125	65.804	2
110	0.021	109	66.293	19
114	36.072	125	66.333	4
116	61.622	111	66.314	3
121	0.147	189	61.968	12
126	0.000	163	66.166	73
139	0.821	190	66.333	9
142	8.723	151	66.307	6
148	7.756	31	50.897	7
150	5.198	137	61.372	6
156	0.763	45	63.396	10
162	48.820	68	66.210	2
163	2.104	100	66.312	5

Expected_firearm	LR_Expected	Predicted_firearm	LR_Predicted	Rank
164	0.000	115	62.277	90
166	0.007	12	66.230	16
167	14.592	103	65.456	5
174	60.012	45	60.022	2
185	66.230	103	191.539	2

Table 32: Faux rapprochements générées par par *BulleText* pour le cas 4VS12

Expected_firearm	LR_Expected	Predicted_firearm	LR_Predicted	Rank
2	65.113	76	65.791	2
33	47.163	46	66.333	4
34	14.910	31	65.927	5
42	42.830	40	62.178	4
43	0.085	45	66.329	6
48	9.740	164	66.272	5
50	49.839	118	59.500	2
62	0.022	200	69.317	7
97	0.000	101	66.291	31
102	0.148	145	66.299	11
109	7.783	107	66.253	6
110	0.316	109	66.293	8
121	0.165	184	55.884	17
125	63.561	87	66.333	3
138	0.011	155	66.333	9
142	0.000	8	65.824	23
147	0.000	28	66.019	19
149	3.961	145	184.541	7
153	48.178	145	128.375	2
157	66.206	160	66.256	2
161	23.767	68	66.292	4
163	21.604	180	47.233	4
167	4.598	139	57.614	7
178	64.932	156	66.333	3
179	16.849	89	66.094	4
183	44.179	90	60.353	2
196	65.923	163	65.947	2

Table 33: Faux rapprochements générées par par *BulleText* pour le cas 5VS12

Expected_firearm	LR_Expected	Predicted_firearm	LR_Predicted	Rank
26	58.919	107	65.325	4
27	31.064	21	61.793	4
33	16.007	160	64.979	4
34	22.855	60	65.550	5
40	58.878	55	64.292	2
42	0.089	26	62.840	23
43	46.183	45	76.748	3

Expected_firearm	LR_Expected	Predicted_firearm	LR_Predicted	Rank
45	0.524	149	66.311	6
48	0.000	162	66.332	29
50	0.637	118	60.252	11
52	30.754	180	66.244	3
56	66.333	180	66.333	2
59	2.063	58	61.850	9
70	61.150	165	65.566	2
73	54.301	171	66.268	3
76	0.000	101	65.945	71
77	17.028	182	66.053	4
78	3.610	167	66.304	6
79	44.303	40	66.315	4
82	2.359	155	58.959	12
83	66.301	103	66.333	2
84	2.968	112	66.333	8
88	4.970	119	64.708	7
89	59.523	172	65.676	2
92	57.699	55	66.194	2
93	16.486	123	66.251	4
97	0.113	102	66.223	13
104	50.926	174	66.028	4
109	0.000	101	66.310	43
110	0.001	157	66.332	15
114	1.288	163	66.330	7
116	0.012	55	66.204	22
121	4.005	129	81.632	5
129	18.256	150	64.357	4
135	72.311	137	89.613	2
139	0.000	112	64.966	66
140	65.928	17	66.333	2
141	0.206	149	66.057	12
142	0.000	151	66.326	70
144	65.161	179	66.130	2
148	0.013	90	66.305	15
152	63.669	130	65.385	2
158	0.002	177	66.329	12
159	0.030	152	66.329	14
161	0.932	174	66.321	5
162	66.330	190	66.333	2
163	2.141	159	66.299	5
164	1.392	151	66.207	7
176	0.000	183	71.702	21
179	63.572	118	63.880	2
195	49.449	192	60.622	2
196	0.000	147	66.287	29

Table 34: Faux rapprochements générées par par *BulleText* pour le cas *6VS12*

Expected_firearm	LR_Expected	Predicted_firearm	LR_Predicted	Rank
70	22.275	33	66.068	5
74	0.425	103	65.911	12
76	58.080	159	66.326	3
77	0.000	182	65.247	24
79	0.014	200	66.329	8
82	28.568	179	66.330	3
83	0.000	103	66.333	32
84	65.955	112	66.258	2
85	2.386	91	66.092	6
86	0.332	200	65.815	10
97	65.752	127	66.325	2
102	0.000	60	66.252	54
104	32.637	174	63.980	5
107	65.042	159	65.846	3
109	0.046	60	66.333	16
110	0.198	12	64.628	12
114	0.000	30	66.302	19
116	0.004	40	66.194	14
117	0.415	190	66.237	8
118	5.129	198	65.235	8
121	38.375	80	44.080	2
124	63.016	175	66.333	2
125	0.582	120	66.153	7
129	3.374	40	83.448	8
130	19.956	186	66.135	5
131	0.042	60	63.152	20
134	66.333	139	66.333	2
135	66.060	134	66.205	2
136	47.934	68	50.645	3
139	0.000	155	64.270	61
142	0.001	151	67.750	22
146	39.440	143	66.333	3
147	0.017	184	198.902	13
148	0.930	60	66.333	7
149	58.845	137	66.229	3
150	0.010	195	60.297	17
153	5.494	145	66.217	6
156	6.602	75	65.928	7
158	2.481	186	65.989	5
161	64.512	200	65.100	2
163	65.946	55	66.317	2
164	0.000	97	66.290	149
167	0.138	125	58.727	10
170	66.333	200	140.903	2
171	65.747	165	66.245	2
172	0.104	75	66.333	10
179	21.009	193	66.288	5
196	0.040	163	66.285	6

Table 35: Faux rapprochements générées par par *BulleText* pour le cas *1VS23*

Expected_firearm	LR_Expected	Predicted_firearm	LR_Predicted	Rank
3	66.285	15	66.333	2
7	12.193	1	62.939	5
26	0.000	86	55.741	34
27	48.927	8	66.329	4
28	0.025	11	66.333	3
31	49.918	145	63.829	3
37	0.101	130	66.298	7
42	64.127	107	66.331	2
43	51.716	184	65.854	4
48	38.979	50	66.297	4
54	0.002	15	67.084	11
55	0.000	200	58.006	101
56	9.312	48	66.333	5
60	0.023	189	66.333	7
63	7.756	157	65.986	7
64	0.023	1	66.264	12
71	0.000	11	66.332	26
75	0.000	164	66.108	66
76	0.271	101	66.309	6
77	0.000	190	66.333	25
80	2.742	121	64.057	6
83	0.000	190	66.332	14
84	59.027	125	66.333	3
86	0.197	121	66.333	4
88	0.176	93	66.344	7
90	0.000	133	66.333	13
91	0.001	31	66.316	23
92	0.067	126	65.022	14
95	66.096	148	66.333	2
100	0.001	182	66.290	28
104	1.710	33	62.674	6
110	0.000	101	66.324	31
112	0.000	167	197.815	12
114	0.000	100	66.333	19
115	0.935	10	44.010	12
116	4.266	126	109.782	5
119	65.974	166	68.982	2
120	65.185	196	66.331	2
123	28.362	169	66.333	4
125	65.497	38	66.264	2
127	2.339	190	66.163	11
131	66.293	145	66.308	2
134	63.826	172	64.366	2
136	65.757	200	66.320	2
138	4.463	48	66.333	5
139	0.004	167	66.935	14
142	0.000	125	66.031	51
147	53.993	17	66.332	3
149	7.306	36	66.117	5
151	0.007	196	66.260	10

Expected_firearm	LR_Expected	Predicted_firearm	LR_Predicted	Rank
155	0.015	22	62.849	12
156	0.001	86	66.331	17
157	5.043	189	49.878	5
158	0.098	190	65.980	5
159	66.317	156	66.333	2
160	1.105	152	66.333	4
161	1.775	186	66.577	6
162	30.746	164	38.456	3
163	0.000	15	66.333	20
165	2.028	200	147.667	6
167	62.268	125	71.245	3
169	15.229	91	66.309	6
171	0.000	33	66.332	37
172	0.775	95	66.286	8
174	2.288	79	66.318	3
178	0.084	137	97.693	12
179	64.249	186	66.311	3
180	0.000	117	66.333	85
183	36.227	164	65.865	4
193	66.334	191	66.353	2
194	15.614	125	66.332	4
195	51.642	181	66.333	4
196	38.945	179	66.244	3
199	0.000	40	66.331	21

Table 36: Faux rapprochements générées par par *BulleText* pour le cas *4VS23*

Expected_firearm	LR_Expected	Predicted_firearm	LR_Predicted	Rank
2	66.333	83	66.333	2
8	52.090	17	66.331	2
34	43.641	58	66.310	4
43	22.269	123	47.503	4
54	9.277	15	60.511	3
56	66.334	48	66.456	2
64	66.330	125	66.331	2
70	26.600	15	65.166	3
97	0.029	189	38.179	13
102	0.083	145	66.360	6
121	0.373	188	66.330	6
131	7.383	170	66.327	6
138	0.000	155	66.277	68
141	63.914	149	66.333	2
147	1.030	27	66.333	8
149	29.192	145	66.333	3
153	77.663	145	178.371	2
157	58.867	174	66.150	4
159	26.209	86	66.330	4
164	29.717	15	66.329	3
176	0.067	148	64.018	7

Table 37: Faux rapprochements générées par par *BulleText* pour le cas 5VS23

Expected_firearm	LR_Expected	Predicted_firearm	LR_Predicted	Rank
27	65.405	22	66.333	2
37	66.272	3	66.317	2
45	30.993	159	66.329	4
49	189.054	116	197.842	2
55	8.454	130	53.188	3
59	0.000	125	66.333	15
62	53.191	136	66.227	2
69	12.901	31	66.213	5
75	0.398	164	66.333	6
76	0.001	156	66.278	18
92	52.947	89	66.315	3
95	0.000	175	66.325	29
97	0.006	155	66.321	12
104	0.000	157	66.321	32
138	0.150	48	64.147	14
148	19.092	111	66.231	5
149	33.821	145	66.332	3
156	54.180	159	61.432	3
158	49.748	179	65.624	3
161	0.011	159	66.027	11
176	21.402	183	57.903	4
196	66.333	144	66.333	2

Table 38: Faux rapprochements générées par par *BulleText* pour le cas 6VS23

Expected_firearm	LR_Expected	Predicted_firearm	LR_Predicted	Rank
74	25.318	164	64.349	3
77	0.000	182	65.435	35
83	66.202	166	66.329	3
86	0.002	200	66.305	15
107	66.057	159	66.333	2
119	63.939	174	66.215	2
124	23.672	101	66.333	5
129	66.275	40	66.389	2
130	66.276	181	66.288	2
131	50.318	170	66.176	3
136	54.837	99	65.995	2
138	1.897	48	66.172	8
147	43.937	184	68.049	4
156	52.375	34	65.786	2
163	0.480	162	66.321	7
164	35.225	125	66.333	3
171	66.288	165	66.332	2
172	19.618	195	66.316	5
174	64.153	129	65.976	2
196	65.936	144	66.333	2

Table 39: Faux rapprochements générées par par *BulleText* pour le cas *1VS34*

Expected_firearm	LR_Expected	Predicted_firearm	LR_Predicted	Rank
7	61.812	37	66.309	4
21	39.393	43	66.333	4
23	0.043	22	66.337	9
26	0.000	138	66.333	55
27	66.333	2	66.333	2
29	0.006	6	66.201	10
31	0.021	131	66.031	13
33	34.906	116	57.301	4
37	36.476	62	66.194	4
43	23.701	86	64.121	4
45	66.333	46	78.611	2
46	65.474	64	66.322	2
48	0.000	126	101.750	52
50	25.215	114	66.326	4
52	65.871	138	66.620	2
55	0.000	106	66.133	82
56	66.117	48	66.448	3
60	50.810	131	65.361	3
63	22.241	99	66.332	4
64	54.416	1	66.332	4
65	0.032	101	66.333	9
71	0.000	11	66.323	78
75	0.000	171	65.632	172
76	1.518	2	66.333	5
77	1.799	190	66.297	7
78	0.107	35	66.333	14
83	0.000	116	49.130	81
84	0.000	126	146.555	56
86	8.005	121	74.413	6
90	0.000	145	66.333	63
91	0.000	166	65.882	33
92	0.000	54	66.332	54
95	0.000	122	66.228	24
97	66.206	120	66.331	2
100	0.774	126	66.292	9
102	0.381	97	66.333	5
104	0.000	60	66.333	22
110	0.000	187	66.327	94
112	0.000	84	66.304	23
114	0.000	100	66.333	25
115	0.003	194	66.329	18
117	0.084	89	64.552	13
120	65.808	21	66.333	4
124	0.001	153	65.990	20
125	0.000	106	66.333	21
129	62.669	99	66.407	3
130	0.000	43	66.299	16
131	66.340	164	66.594	2
134	0.137	135	66.333	9

Expected_firearm	LR_Expected	Predicted_firearm	LR_Predicted	Rank
135	64.007	137	66.331	3
136	33.249	62	65.606	4
138	55.641	56	66.333	3
139	0.000	138	111.581	40
141	7.200	145	66.277	6
142	3.980	194	59.031	5
145	27.227	136	61.339	2
147	0.000	57	66.333	50
150	0.000	200	66.333	48
151	0.000	196	66.328	39
153	0.000	148	65.799	53
155	66.250	127	66.331	3
156	0.268	99	59.538	13
157	65.912	186	69.313	2
158	0.000	173	66.101	19
159	6.224	17	66.369	4
160	0.485	60	66.337	8
161	0.000	153	66.295	20
162	0.000	163	66.332	37
163	0.000	196	67.789	13
164	0.042	68	66.192	7
165	0.005	171	64.969	18
167	0.000	142	65.864	41
168	0.000	82	66.273	38
169	0.003	86	66.333	20
171	66.255	142	66.333	2
175	63.348	57	64.903	2
179	66.333	138	197.104	2
180	0.000	54	66.324	21
183	0.000	122	66.303	130
185	56.923	83	66.333	4
194	0.000	138	66.333	21
195	0.000	191	66.331	15
199	0.001	40	66.558	12

Table 40: Faux rapprochements générées par par *BulleText* pour le cas *2VS34*

Expected_firearm	LR_Expected	Predicted_firearm	LR_Predicted	Rank
15	14.720	54	198.527	4
25	0.145	171	66.316	7
33	5.305	148	66.049	8
48	0.013	56	66.313	10
50	62.285	32	65.741	2
69	1.960	77	66.268	5
90	48.365	157	66.333	4
93	0.000	54	65.547	27
109	0.002	110	66.333	27
114	64.788	126	66.333	3
124	4.092	126	66.329	4

Expected_firearm	LR_Expected	Predicted_firearm	LR_Predicted	Rank
125	66.333	89	66.333	2
129	66.310	148	66.319	2
139	0.012	138	66.171	14
152	13.596	200	66.404	5
156	86.382	149	139.397	2
164	11.396	68	66.333	6
167	0.000	103	66.333	29
196	57.404	126	66.111	3
200	0.006	184	66.333	13

Table 41: Faux rapprochements générées par par *BulleText* pour le cas *5VS34*

Expected_firearm	LR_Expected	Predicted_firearm	LR_Predicted	Rank
37	48.375	3	66.275	2
76	0.000	131	66.333	17
91	64.033	69	65.359	2
92	66.332	148	66.333	2
95	0.000	126	65.993	37
116	49.274	199	66.328	3
134	27.006	161	65.561	4
137	66.287	135	66.365	2
148	24.924	106	66.308	5
156	16.508	149	66.324	4
158	55.200	12	66.254	3
159	17.804	161	66.314	4
161	66.262	149	66.333	2

Table 42: Faux rapprochements générées par par *BulleText* pour le cas *6VS34*

Expected_firearm	LR_Expected	Predicted_firearm	LR_Predicted	Rank
67	0.094	12	66.333	6
86	0.019	200	66.293	12
116	0.740	106	92.061	5
119	56.355	22	66.297	4
121	4.018	60	66.077	5
130	56.726	181	64.000	2
156	0.010	188	66.282	12
163	66.332	180	66.333	2

Table 43: Faux rapprochements générées par par *BulleText* pour le cas *1VS45*

Expected_firearm	LR_Expected	Predicted_firearm	LR_Predicted	Rank
21	3.585	43	66.333	4
22	0.016	120	66.318	17

Expected_firearm	LR_Expected	Predicted_firearm	LR_Predicted	Rank
26	0.000	86	66.334	18
31	0.000	119	65.622	19
32	52.043	142	66.112	4
37	48.262	165	64.717	3
40	2.454	79	66.333	8
42	22.906	70	58.748	3
48	0.000	69	66.077	41
50	12.646	114	66.218	5
55	0.000	138	66.049	32
56	0.001	111	66.333	19
63	52.317	121	66.333	3
64	66.321	127	66.333	2
65	6.519	70	65.991	6
69	27.197	172	64.349	4
71	6.164	1	66.322	6
74	0.000	30	66.304	13
75	0.000	70	66.137	76
76	0.000	95	64.963	30
77	0.000	142	66.333	193
78	0.009	124	64.253	19
80	2.235	60	118.575	7
83	0.000	122	65.445	74
84	0.000	122	66.333	38
86	8.811	161	57.708	6
87	2.799	115	66.103	5
88	0.000	125	66.333	32
89	66.071	149	66.162	2
90	27.643	106	66.325	4
91	0.006	62	66.320	17
92	58.203	187	66.267	2
96	20.634	138	64.767	5
97	0.000	69	66.333	132
100	0.000	95	66.331	29
102	4.185	91	59.329	8
104	57.161	63	66.319	4
107	1.479	127	66.229	9
110	0.000	187	66.063	135
112	0.000	167	191.391	9
114	0.005	119	66.321	14
117	61.327	90	66.209	3
120	5.275	21	66.333	7
121	35.730	199	66.065	4
122	65.634	143	66.224	2
123	44.828	79	66.332	4
124	32.208	81	66.333	4
125	1.364	119	66.329	7
126	0.000	119	66.072	15
127	66.094	99	66.332	2
128	66.322	112	66.333	3
129	1.496	99	66.358	6
130	0.000	60	65.811	26
131	0.281	61	66.287	7

Expected_firearm	LR_Expected	Predicted_firearm	LR_Predicted	Rank
135	66.481	68	66.537	2
136	0.746	174	66.329	7
137	66.326	45	66.333	2
139	0.000	70	66.407	57
141	20.422	140	64.907	5
142	0.000	119	66.332	61
147	0.011	153	66.325	12
150	0.000	197	64.721	51
151	0.000	143	66.330	48
153	0.000	195	66.333	13
155	5.059	24	66.120	6
156	0.752	178	66.289	9
157	0.009	60	66.296	15
159	0.022	17	66.288	17
160	7.778	60	111.431	4
161	0.000	60	66.305	29
162	9.190	198	66.331	5
163	0.043	196	66.288	8
164	0.000	137	66.238	43
165	0.128	174	66.195	6
168	0.000	155	66.333	53
169	63.159	152	66.328	4
170	0.057	134	66.285	6
171	0.002	142	66.333	16
172	15.370	199	66.333	5
173	66.332	60	66.333	2
175	66.317	57	66.333	2
180	0.000	117	66.333	66
183	0.000	147	63.683	93
184	0.107	152	66.321	5
185	44.801	139	66.226	4
186	63.012	143	64.125	2
189	0.194	23	66.328	10
190	0.145	138	66.078	7
192	10.676	195	66.332	4
195	0.000	200	66.331	20
196	0.000	143	66.333	9
199	33.324	106	64.707	3

Table 44: Faux rapprochements générées par par *BulleText* pour le cas *2VS45*

Expected_firearm	LR_Expected	Predicted_firearm	LR_Predicted	Rank
8	5.241	21	56.717	10
15	66.333	11	66.333	2
26	43.795	195	66.321	3
34	0.172	161	66.290	7
41	0.285	37	64.693	12
42	0.083	197	65.730	13
43	0.064	174	66.326	5

Expected_firearm	LR_Expected	Predicted_firearm	LR_Predicted	Rank
50	0.002	11	66.332	12
72	66.390	73	68.791	2
77	12.206	122	66.333	6
80	39.759	60	66.022	2
86	0.002	131	66.333	17
89	0.474	16	66.265	7
93	0.000	119	66.216	26
97	0.014	178	66.227	15
101	64.974	142	66.332	3
107	66.325	16	66.333	2
109	0.000	148	64.294	69
110	3.605	148	64.231	4
114	0.000	34	66.333	35
125	0.000	11	66.333	21
129	0.000	133	65.948	23
138	56.211	14	66.324	2
139	4.268	119	159.773	6
144	66.333	132	66.333	2
145	8.983	61	66.332	5
149	24.287	79	57.985	4
163	0.000	171	63.726	35
164	0.001	62	66.299	15
186	59.869	153	66.290	3
195	28.855	139	66.333	3
196	65.571	138	66.367	2
200	42.680	60	58.236	2

Table 45: Faux rapprochements générées par par *BulleText* pour le cas *3VS45*

Expected_firearm	LR_Expected	Predicted_firearm	LR_Predicted	Rank
54	65.988	190	66.333	2
89	61.576	198	66.333	3
97	0.000	139	66.333	22
126	0.000	34	66.300	31
130	66.308	81	66.332	3
138	0.017	125	66.333	10
159	35.760	152	66.332	4
161	31.915	134	49.486	2
164	0.000	30	65.604	80
166	0.002	31	66.326	17
172	0.000	142	66.332	18
176	66.333	134	66.333	2

Table 46: Faux rapprochements générées par par *BulleText* pour le cas *6VS45*

Expected_firearm	LR_Expected	Predicted_firearm	LR_Predicted	Rank
89	52.832	143	66.329	4
121	16.312	80	66.248	5
126	0.040	71	66.323	4
145	66.292	133	66.333	2
148	53.637	198	66.069	2
150	49.174	95	66.104	3
156	51.607	189	66.333	3
172	0.125	197	66.331	7

Table 47: Faux rapprochements générées par par *BulleText* pour le cas *1VS56*

Expected_firearm	LR_Expected	Predicted_firearm	LR_Predicted	Rank
62	43.573	136	46.806	2
63	11.569	121	46.344	6
64	0.000	120	46.333	34
65	1.284	94	46.326	7
69	6.810	172	46.140	4
70	39.189	190	46.333	4
71	1.768	147	46.333	4
75	0.000	120	46.333	85
76	5.549	120	44.051	4
77	0.000	98	46.333	114
78	45.702	85	46.313	2
79	9.198	153	44.150	4
82	45.284	120	47.393	3
83	0.000	190	46.376	94
84	0.000	194	46.233	14
86	0.062	156	48.224	6
87	11.598	190	46.331	5
88	0.012	122	46.242	14
90	0.000	133	46.332	14
91	9.170	154	46.309	5
92	1.293	190	46.333	4
94	46.401	70	51.132	2
97	0.000	120	46.365	88
102	0.073	91	46.333	5
105	8.208	74	45.961	3
107	0.015	143	43.758	14
109	29.123	143	46.325	3
110	0.000	143	46.326	84
112	5.478	167	51.132	6
114	0.000	119	46.315	40
115	4.813	184	46.333	7
116	0.000	147	46.333	13
117	0.000	191	46.329	37
121	43.742	145	46.333	2
122	0.369	147	46.333	8

Expected_firearm	LR_Expected	Predicted_firearm	LR_Predicted	Rank
123	0.015	119	44.317	9
125	0.000	119	46.333	66
127	46.179	143	46.333	4
128	46.333	96	46.333	2
129	0.011	121	46.329	5
130	4.381	165	38.849	7
131	43.508	61	44.469	2
134	0.000	126	46.030	16
136	45.191	123	46.333	2
137	39.985	149	46.333	3
139	0.000	134	46.121	62
141	21.403	153	46.300	3
142	0.000	126	46.332	92
144	41.903	180	46.352	3
145	0.001	79	46.333	12
147	23.764	156	46.325	4
150	0.000	174	46.218	18
151	0.000	120	46.592	54
153	0.002	79	46.083	13
157	20.638	79	41.750	4
158	12.915	120	46.296	4
159	0.023	94	43.321	13
160	0.000	188	49.797	76
161	22.164	186	46.328	4
162	10.821	198	46.333	6
163	0.000	126	46.320	22
164	0.009	135	45.598	12
166	45.721	142	46.276	2
167	1.761	120	44.942	5
168	0.000	162	46.330	16
170	42.062	143	46.296	4
171	0.000	120	46.333	17
172	46.333	99	46.333	2
178	0.000	184	46.333	23
180	0.000	89	46.330	28
183	0.000	190	46.324	60
184	0.001	152	46.279	9
185	4.243	190	46.333	5
186	17.563	200	46.320	4
187	46.326	96	46.333	2
189	11.720	143	44.637	5
191	0.631	194	46.326	5
192	3.033	94	46.333	6
195	0.184	79	46.333	9
196	0.000	120	125.431	45
199	1.455	133	47.891	7

Table 48: Faux rapprochements générées par par *BulleText* pour le cas *2VS56*

Expected_firearm	LR_Expected	Predicted_firearm	LR_Predicted	Rank
72	10.688	120	46.333	4
77	0.080	190	46.302	10
79	26.283	81	44.204	3
83	38.037	119	55.382	3
86	0.000	184	46.333	19
87	32.694	89	43.831	2
92	14.359	190	46.330	4
93	0.000	119	46.277	18
96	9.298	153	46.332	4
97	0.006	156	44.908	26
101	0.062	76	46.330	5
107	1.121	143	45.514	10
109	0.003	96	35.694	24
110	38.055	148	46.285	4
114	0.000	120	102.367	11
116	46.330	71	46.333	3
125	0.000	126	46.333	78
129	0.000	94	46.333	14
131	46.107	156	46.333	2
138	0.398	75	46.268	8
139	0.000	159	44.756	39
142	46.333	126	46.333	2
144	46.205	138	46.325	2
148	0.135	120	46.332	6
158	46.271	177	46.276	2
163	0.000	119	46.331	37
164	0.000	169	45.828	15
167	0.000	103	46.333	14
171	4.956	147	46.333	5
182	0.278	124	41.154	10
186	46.064	153	46.324	2
195	0.812	79	46.508	6
196	0.000	119	46.321	19
200	0.324	79	46.322	7

Table 49: Faux rapprochements générées par par *BulleText* pour le cas *3VS56*

Expected_firearm	LR_Expected	Predicted_firearm	LR_Predicted	Rank
66	46.332	165	46.677	2
69	37.031	95	44.900	3
77	59.412	69	126.082	2
89	8.637	199	46.296	4
106	15.939	133	46.333	4
137	46.232	123	46.332	3
138	0.000	190	46.332	11
149	12.487	159	45.800	3
152	46.350	161	48.854	2

Expected_firearm	LR_Expected	Predicted_firearm	LR_Predicted	Rank
163	0.002	95	46.333	12
164	13.943	172	46.307	5
166	25.073	190	32.663	3
171	0.001	147	46.332	15
200	46.641	174	46.875	2

Table 50: Faux rapprochements générées par par *BulleText* pour le cas *4VS56*

Expected_firearm	LR_Expected	Predicted_firearm	LR_Predicted	Rank
98	43.043	70	46.011	2
99	25.442	129	45.953	2
116	46.207	111	46.331	3
121	0.415	161	46.065	6
138	0.000	89	43.539	9
139	45.280	174	46.327	4
142	43.228	75	46.307	4
147	46.298	152	46.333	2
148	3.477	91	46.329	5
157	45.960	121	46.333	2
187	46.309	120	46.333	3

Table 51: Faux rapprochements générées par par *BulleText* pour le cas *4VS123*

Expected_firearm	LR_Expected	Predicted_firearm	LR_Predicted	Rank
62	60.777	200	73.471	3
97	0.000	101	66.332	18
102	3.973	145	66.321	6
121	6.372	80	70.673	5
138	0.596	155	66.333	12
147	0.865	23	66.323	8
149	14.131	145	177.912	5

Table 52: Faux rapprochements générées par par *BulleText* pour le cas *5VS123*

Expected_firearm	LR_Expected	Predicted_firearm	LR_Predicted	Rank
42	62.413	198	63.126	2
45	66.149	137	66.316	2
59	12.271	54	42.528	7
69	41.326	97	65.872	4
75	66.070	164	66.332	2
76	0.008	131	64.855	23
77	66.005	183	66.125	2
92	50.654	129	52.406	3
97	0.195	69	66.140	11

Expected_firearm	LR_Expected	Predicted_firearm	LR_Predicted	Rank
104	59.590	58	64.707	2
158	47.455	179	65.316	2
159	66.024	152	66.147	2
161	0.044	159	66.332	11
164	63.565	137	65.886	2
176	14.638	183	67.191	5
196	65.019	144	66.298	2

Table 53: Faux rapprochements générées par par *BulleText* pour le cas *6VS123*

Expected_firearm	LR_Expected	Predicted_firearm	LR_Predicted	Rank
77	0.016	183	66.026	21
79	24.127	200	65.502	3
83	0.000	103	66.333	10
86	59.088	156	66.017	2
130	55.645	86	66.180	4
131	27.059	152	65.851	4
139	35.164	155	59.463	2
147	0.093	184	198.545	10
149	44.711	137	56.849	3
156	31.010	75	65.732	3
164	0.422	125	55.206	10
196	56.811	144	66.263	3

Table 54: Faux rapprochements générées par par *BulleText* pour le cas *1VS234*

Expected_firearm	LR_Expected	Predicted_firearm	LR_Predicted	Rank
26	0.007	86	78.456	24
31	44.541	119	66.140	3
37	31.438	130	64.524	4
48	0.406	98	61.738	12
52	66.123	138	66.392	2
55	0.000	200	66.334	59
56	66.252	48	69.460	2
60	65.268	189	66.333	2
63	15.419	157	64.700	5
71	0.000	20	66.333	17
75	0.000	171	49.135	61
76	65.826	2	66.321	3
77	1.557	190	66.333	7
80	56.060	127	63.845	2
83	0.051	190	65.916	16
84	55.830	126	66.308	4
86	33.638	121	66.235	3
88	66.328	93	66.338	2
90	0.000	145	66.328	21
91	0.000	64	66.333	29

Expected_firearm	LR_Expected	Predicted_firearm	LR_Predicted	Rank
92	0.000	187	65.586	22
95	0.387	148	66.333	5
100	4.385	182	66.322	7
104	0.108	157	65.693	11
110	0.006	54	62.233	28
112	0.000	84	66.333	11
114	10.716	100	66.333	5
115	57.748	15	62.913	3
120	19.104	2	66.324	6
125	50.309	106	66.329	3
136	66.808	200	66.973	2
138	65.841	144	66.318	2
139	0.034	138	71.842	7
142	0.092	125	66.075	13
147	23.913	17	64.153	4
151	0.235	196	65.330	8
155	0.008	139	66.249	11
156	47.657	86	66.333	3
158	38.079	104	65.590	2
159	47.802	156	65.992	3
160	6.300	60	66.327	6
161	0.078	186	103.371	13
162	0.049	114	66.325	17
163	0.000	196	187.845	18
164	17.312	68	66.291	4
165	0.430	200	90.305	7
169	0.013	86	66.323	13
171	0.248	59	66.329	7
180	0.000	117	66.333	46
183	0.002	125	66.617	20
194	0.115	125	66.333	7
195	46.156	200	66.295	3
199	0.102	40	66.305	10

Table 55: Faux rapprochements générées par par *BulleText* pour le cas *5VS234*

Expected_firearm	LR_Expected	Predicted_firearm	LR_Predicted	Rank
76	0.067	131	66.331	12
95	0.030	109	64.233	15
104	0.018	157	66.332	8
121	66.332	153	66.333	2
158	66.186	98	66.236	2

Table 56: Faux rapprochements générées par par *BulleText* pour le cas *6VS234*

Expected_firearm	LR_Expected	Predicted_firearm	LR_Predicted	Rank
86	0.688	145	66.149	6
119	54.798	196	59.210	2
136	29.756	137	42.211	4
138	64.329	56	65.592	4
156	10.688	188	65.683	4
174	54.343	150	66.215	2

Table 57: Faux rapprochements générées par par *BulleText* pour le cas *1VS345*

Expected_firearm	LR_Expected	Predicted_firearm	LR_Predicted	Rank
21	43.297	121	61.420	4
22	30.429	12	65.993	4
23	12.096	22	60.247	2
26	0.002	106	65.979	18
29	47.297	6	63.758	3
31	0.063	119	66.175	19
32	64.754	126	66.309	3
37	57.108	174	65.956	2
45	66.333	46	99.202	2
48	0.001	49	65.418	24
50	56.533	114	66.333	2
55	0.000	174	63.466	33
56	14.966	3	66.331	5
59	66.333	27	66.342	2
63	3.058	121	66.333	6
64	64.144	138	66.240	3
65	0.453	190	65.244	12
71	0.000	27	66.327	12
74	66.218	164	66.330	3
75	0.000	171	66.142	97
76	2.256	126	66.329	5
77	5.141	190	66.330	5
78	66.332	35	66.333	2
80	65.978	161	112.984	3
83	0.000	190	66.212	57
84	0.000	126	66.333	60
86	1.592	121	65.540	7
90	26.126	145	66.333	3
91	0.000	62	66.373	32
92	66.323	54	66.333	2
100	0.031	126	66.333	13
110	0.000	187	65.269	108
112	0.000	84	66.312	18
114	0.000	100	66.332	22
115	49.690	138	66.243	3
116	66.333	73	66.333	2
117	0.514	119	66.278	8

Expected_firearm	LR_Expected	Predicted_firearm	LR_Predicted	Rank
120	0.017	73	66.333	9
121	52.837	104	62.144	3
122	66.257	144	66.333	3
123	65.301	79	66.327	2
125	0.013	106	66.331	11
129	9.550	99	66.303	4
130	0.465	133	63.213	9
131	45.760	164	65.827	4
135	36.797	137	66.321	3
136	51.485	62	60.063	2
139	0.000	138	162.393	9
141	7.444	107	65.787	6
142	0.020	126	65.725	18
145	4.885	136	66.332	5
147	0.000	57	66.326	36
150	0.000	138	65.961	35
151	0.000	36	66.281	55
153	0.000	1	66.333	30
155	5.330	56	66.333	5
156	0.093	86	66.112	16
157	42.991	154	60.893	3
158	38.571	128	65.281	2
159	0.689	17	66.333	5
160	0.184	60	66.449	6
161	2.926	96	64.712	6
162	0.000	198	66.333	13
163	0.000	196	197.844	13
164	0.003	137	64.864	12
165	2.561	66	60.326	7
167	10.157	142	66.333	7
168	0.001	6	66.071	21
169	1.118	86	64.414	9
171	9.804	142	66.333	5
178	63.523	137	65.940	2
179	66.333	138	113.508	2
180	0.000	138	66.328	27
183	0.000	138	65.817	151
186	66.335	136	66.853	2
189	11.467	188	61.111	6
190	35.520	18	72.884	3
195	0.000	152	66.263	18
196	39.368	142	66.273	3
199	0.005	40	66.330	12

Table 58: Faux rapprochements générées par par *BulleText* pour le cas *2VS345*

Expected_firearm	LR_Expected	Predicted_firearm	LR_Predicted	Rank
15	66.294	54	197.007	2
33	1.597	10	66.215	6

Expected_firearm	LR_Expected	Predicted_firearm	LR_Predicted	Rank
42	8.050	62	56.035	6
43	66.316	39	66.327	2
48	63.357	38	65.344	2
50	52.762	125	57.627	2
86	17.993	165	65.934	5
93	0.000	54	66.333	33
109	0.365	110	66.011	9
110	63.606	190	65.500	2
114	60.585	126	66.358	4
129	23.252	148	66.130	4
139	0.218	138	66.292	10
156	67.129	149	67.648	2
163	0.262	171	65.915	8
164	0.482	68	66.333	7
167	1.875	103	66.288	7
196	0.951	126	66.331	4
200	51.232	184	66.333	4

Table 59: Faux rapprochements générées par par *BulleText* pour le cas *6VS345*

Expected_firearm	LR_Expected	Predicted_firearm	LR_Predicted	Rank
86	66.538	79	91.061	2
121	54.237	189	62.597	2
156	36.042	21	66.178	3

Table 60: Faux rapprochements générées par par *BulleText* pour le cas *1VS456*

Expected_firearm	LR_Expected	Predicted_firearm	LR_Predicted	Rank
63	46.324	121	138.974	2
64	44.541	138	45.080	2
65	0.585	194	46.333	7
70	46.291	190	46.320	2
71	27.047	147	46.333	3
72	50.877	73	52.355	2
75	0.000	120	46.333	60
76	32.838	116	46.333	2
77	0.000	98	46.317	131
78	41.765	124	46.002	4
83	0.000	147	46.333	84
84	0.000	122	46.333	29
86	0.218	121	45.517	10
87	1.539	190	46.333	9
88	0.000	122	46.333	14
90	0.011	128	46.322	9
91	1.450	154	43.714	9
92	0.959	126	46.333	7
97	0.000	120	46.333	69

Expected_firearm	LR_Expected	Predicted_firearm	LR_Predicted	Rank
102	3.941	127	46.333	5
105	46.463	122	59.378	2
107	0.133	127	46.075	9
110	0.000	119	45.917	124
112	12.772	167	138.611	4
114	0.001	119	46.036	17
116	18.211	196	46.333	4
117	0.000	191	46.333	18
122	46.333	126	46.333	2
123	9.818	119	46.322	5
125	0.696	119	46.333	7
127	14.009	189	42.581	5
128	46.321	127	46.333	3
129	0.005	99	46.328	8
130	0.091	165	45.088	10
135	34.022	68	46.206	2
136	6.504	123	46.282	7
139	0.000	70	46.333	63
141	21.845	153	46.329	4
142	0.000	194	37.660	41
145	25.602	79	46.326	3
147	44.181	153	46.333	4
150	0.005	174	46.295	14
151	0.000	120	46.333	19
153	0.389	195	45.994	9
157	29.434	186	46.320	3
159	0.449	94	46.262	10
160	0.023	121	46.525	12
161	34.813	186	46.333	4
162	45.635	198	46.333	2
163	4.195	196	46.350	5
164	0.001	139	45.913	14
168	0.000	155	46.333	40
170	0.106	143	46.333	5
171	17.125	142	46.333	4
175	45.651	199	46.299	2
178	31.960	190	46.281	4
179	8.017	144	33.771	5
180	0.000	117	46.333	48
183	0.000	126	46.167	66
184	0.204	194	46.314	7
192	43.988	94	46.332	3
195	0.717	200	46.260	7
196	0.328	119	36.166	12
199	0.010	159	46.271	17

Table 61: Faux rapprochements générées par par *BulleText* pour le cas *2VS456*

Expected_firearm	LR_Expected	Predicted_firearm	LR_Predicted	Rank
77	36.249	148	57.212	3
86	0.028	184	46.283	9
93	0.000	119	46.333	21
97	37.603	98	46.139	3
109	0.000	178	46.106	34
114	0.002	124	91.654	13
121	46.073	150	46.333	3
125	1.814	95	46.332	8
129	0.005	94	46.329	12
131	26.975	156	42.526	2
138	0.047	144	46.245	11
139	0.074	119	117.611	13
163	0.001	141	46.268	17
164	0.124	136	46.216	11
167	46.270	103	46.333	2
196	46.249	126	46.281	2

Table 62: Faux rapprochements générées par par *BulleText* pour le cas *3VS456*

Expected_firearm	LR_Expected	Predicted_firearm	LR_Predicted	Rank
138	0.255	125	46.331	4
149	0.040	159	137.853	5
164	0.044	70	56.604	13
166	40.900	85	45.726	3

Table 63: Faux rapprochements générées par par *BulleText* pour le cas *5VS1234*

Expected_firearm	LR_Expected	Predicted_firearm	LR_Predicted	Rank
76	1.022	131	66.331	13
104	41.337	58	65.281	3
121	63.611	153	66.308	3
158	3.287	179	63.999	8
159	16.870	152	51.245	5

Table 64: Faux rapprochements générées par par *BulleText* pour le cas *6VS1234*

Expected_firearm	LR_Expected	Predicted_firearm	LR_Predicted	Rank
86	58.638	156	64.924	3
156	11.429	188	66.039	5
174	47.137	200	63.744	3

Table 65: Faux rapprochements générées par par *BulleText* pour le cas *1VS2345*

Expected_firearm	LR_Expected	Predicted_firearm	LR_Predicted	Rank
26	0.042	86	197.601	13
31	35.767	119	66.247	4
37	62.228	174	65.956	2
48	0.467	49	66.232	12
55	0.000	200	66.322	50
56	58.735	48	66.502	3
60	64.595	189	66.332	2
63	26.571	121	66.333	5
71	0.001	1	66.331	13
75	0.148	15	58.268	16
77	2.319	190	66.333	4
80	61.385	127	66.199	2
83	0.000	84	66.219	25
84	22.543	126	66.057	3
86	5.444	133	66.316	5
88	66.219	93	66.323	2
90	2.884	145	63.604	5
91	0.001	62	66.301	17
110	0.001	147	59.115	46
112	0.000	167	91.917	15
114	0.838	100	66.333	5
116	66.333	73	66.333	2
120	1.876	38	63.161	7
139	5.254	138	58.303	5
142	0.010	124	65.979	23
147	31.955	153	45.163	3
151	0.203	36	65.703	8
153	59.342	152	65.684	3
155	0.085	56	66.328	8
156	35.971	86	66.333	4
159	1.506	138	65.725	7
160	9.895	60	66.077	5
161	2.477	186	100.899	4
162	0.302	198	66.333	9
163	0.001	196	198.917	11
164	9.380	136	65.200	3
165	2.441	200	66.386	7
167	66.217	142	66.314	2
169	65.685	91	65.704	2
171	60.440	33	66.325	4
179	66.333	138	144.151	2
180	0.000	144	66.334	49
183	0.000	82	65.548	28
194	66.251	125	66.333	2
195	64.104	181	66.296	2
199	0.942	40	66.308	7

Table 66: Faux rapprochements générées par par *BulleText* pour le cas *6VS2345*

Expected_firearm	LR_Expected	Predicted_firearm	LR_Predicted	Rank
------------------	-------------	-------------------	--------------	------

Table 67: Faux rapprochements générées par par *BulleText* pour le cas *1VS3456*

Expected_firearm	LR_Expected	Predicted_firearm	LR_Predicted	Rank
63	44.133	121	76.893	2
64	4.303	120	43.391	5
65	4.832	194	46.291	5
71	0.000	116	46.333	19
75	0.000	120	46.242	72
76	34.385	116	46.333	2
77	0.101	98	45.679	15
80	41.275	161	112.035	3
82	46.333	125	46.333	2
83	0.000	147	46.333	68
84	0.000	126	46.325	59
86	10.961	188	40.625	4
88	38.707	126	46.322	3
90	0.003	128	46.323	8
91	0.004	156	46.327	9
92	45.613	126	103.760	3
97	46.281	120	46.331	2
100	17.412	155	24.199	5
102	34.235	91	40.290	2
107	46.216	94	46.333	2
110	0.000	156	45.404	86
112	21.750	113	46.330	3
114	0.001	100	46.066	15
115	41.155	138	46.333	2
116	46.333	73	46.333	2
117	0.002	119	46.333	13
122	46.332	126	46.333	3
123	33.800	79	45.343	3
125	0.026	130	46.081	9
129	0.114	94	46.169	7
130	2.123	133	44.073	5
135	42.281	137	46.324	2
139	0.000	138	123.148	18
141	28.582	153	46.326	4
142	0.022	126	82.456	10
145	5.978	79	46.245	5
147	34.381	156	46.231	4
150	0.006	197	46.160	17
151	0.000	122	46.329	34
153	0.277	195	40.708	13
157	41.430	102	45.451	3
158	0.042	128	46.329	6
159	0.064	156	46.326	8

Expected_firearm	LR_Expected	Predicted_firearm	LR_Predicted	Rank
160	0.001	121	51.382	19
161	27.960	186	46.308	3
162	1.473	198	46.333	6
163	0.078	196	138.991	3
164	0.000	136	56.736	14
167	0.069	154	46.333	6
168	0.026	155	46.333	15
171	12.378	142	46.333	5
178	45.414	138	46.181	4
179	45.973	138	62.478	2
180	0.000	138	46.333	21
183	0.000	126	48.420	73
184	38.409	178	45.789	2
186	47.764	136	83.379	2
195	0.003	152	46.235	11
196	46.276	142	46.311	2
199	0.000	137	46.077	19

Table 68: Faux rapprochements générées par par *BulleText* pour le cas *2VS3456*

Expected_firearm	LR_Expected	Predicted_firearm	LR_Predicted	Rank
86	45.733	165	45.772	2
93	0.000	119	46.333	23
109	2.322	148	46.324	8
114	42.895	126	134.864	2
125	46.332	89	46.333	2
129	3.000	94	46.259	7
139	0.002	138	46.045	14
145	46.276	61	46.332	2
156	46.488	149	49.710	2
163	0.237	200	45.959	11
164	2.283	68	45.239	8
167	5.343	103	46.306	5
196	10.244	126	46.196	3
200	21.637	184	46.333	3

Table 69: Faux rapprochements générées par par *BulleText* pour le cas *6VS12345*

Expected_firearm	LR_Expected	Predicted_firearm	LR_Predicted	Rank
79	45.724	106	65.376	2
174	65.393	150	66.284	2

Table 70: Faux rapprochements générées par par *BulleText* pour le cas *1VS23456*

Expected_firearm	LR_Expected	Predicted_firearm	LR_Predicted	Rank
63	52.668	121	119.890	2
71	0.000	147	46.333	14
75	0.009	120	41.860	21
77	35.631	190	45.471	2
80	14.499	127	46.332	4
83	0.006	147	46.326	20
84	4.051	126	40.257	7
90	0.000	128	46.332	9
91	0.029	156	46.332	10
105	40.096	91	40.623	2
110	0.000	75	39.525	57
112	9.799	167	47.015	3
114	46.273	100	46.333	2
115	34.455	138	46.326	3
116	46.333	73	46.333	3
122	46.333	126	46.333	3
125	46.249	106	46.305	2
139	0.255	138	57.741	7
142	0.037	126	68.460	9
145	11.301	79	46.060	5
151	0.122	120	46.032	6
156	46.285	86	46.313	2
159	46.216	156	46.298	2
160	0.029	189	45.984	12
161	30.947	186	57.034	3
162	1.082	198	46.333	7
163	0.001	196	138.181	5
164	5.550	136	52.448	5
179	45.272	183	46.317	2
180	0.000	144	46.334	30
183	0.003	126	46.341	16
184	39.184	178	44.026	3
195	41.245	200	44.340	3
196	26.716	190	44.724	3
199	0.058	149	34.939	16

## Annexe 4

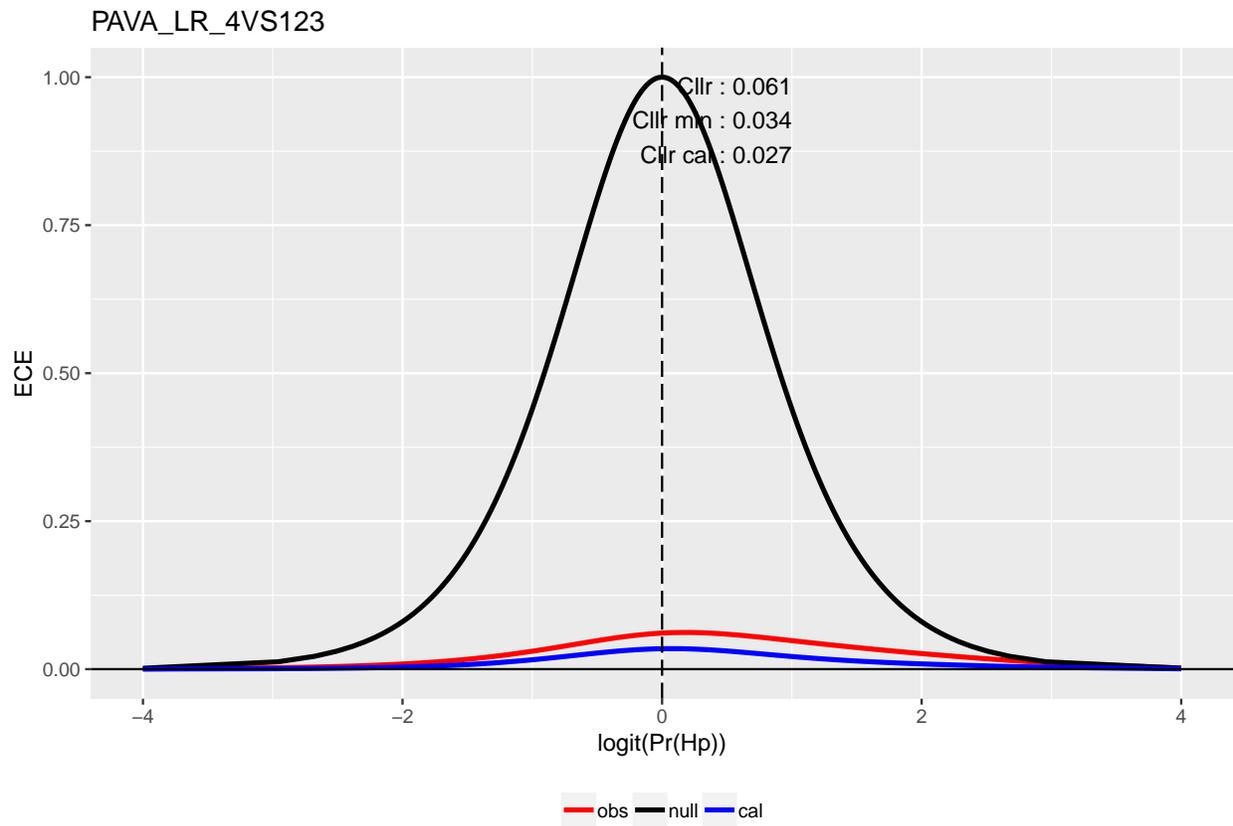
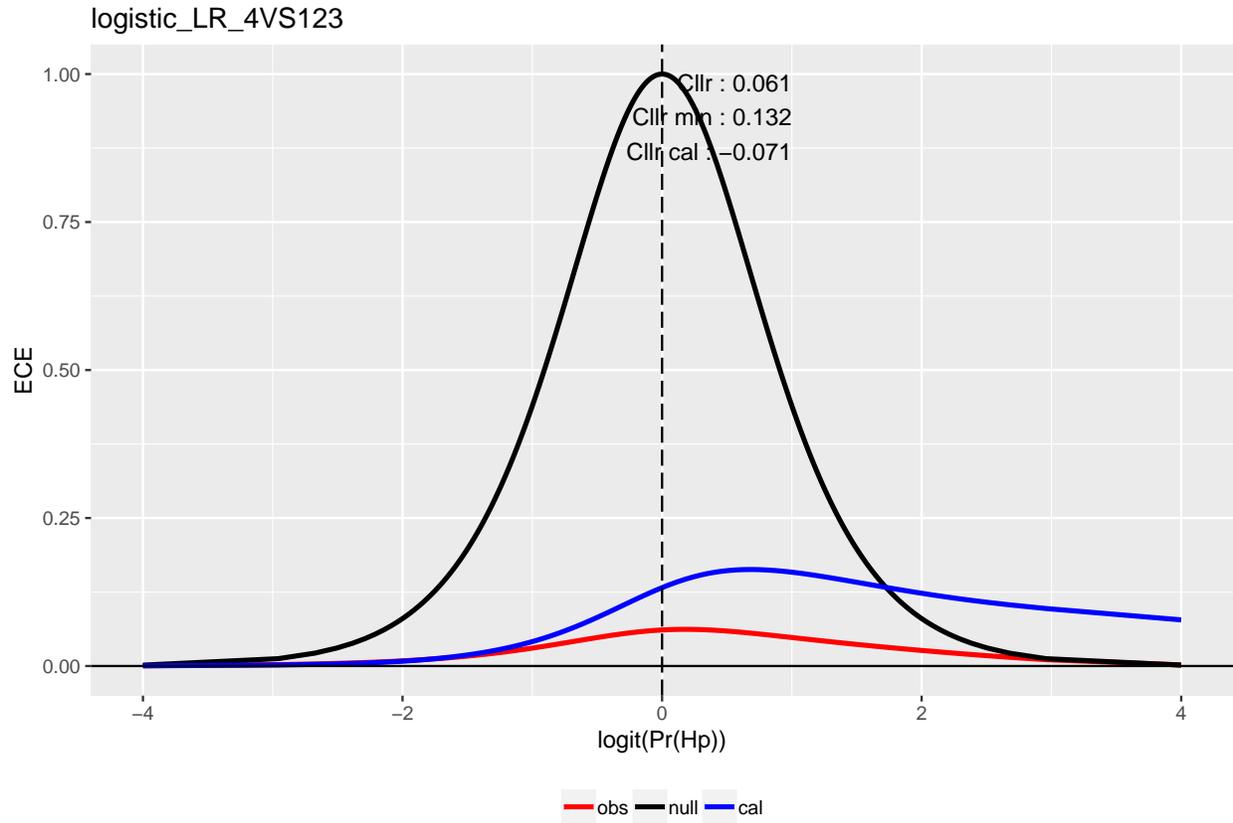


Figure 90: En haut: Courbe de calibration *ECE* obtenue par régression logistique. En bas: Courbe de calibration *ECE* obtenue par la méthode *PAVA*. 136

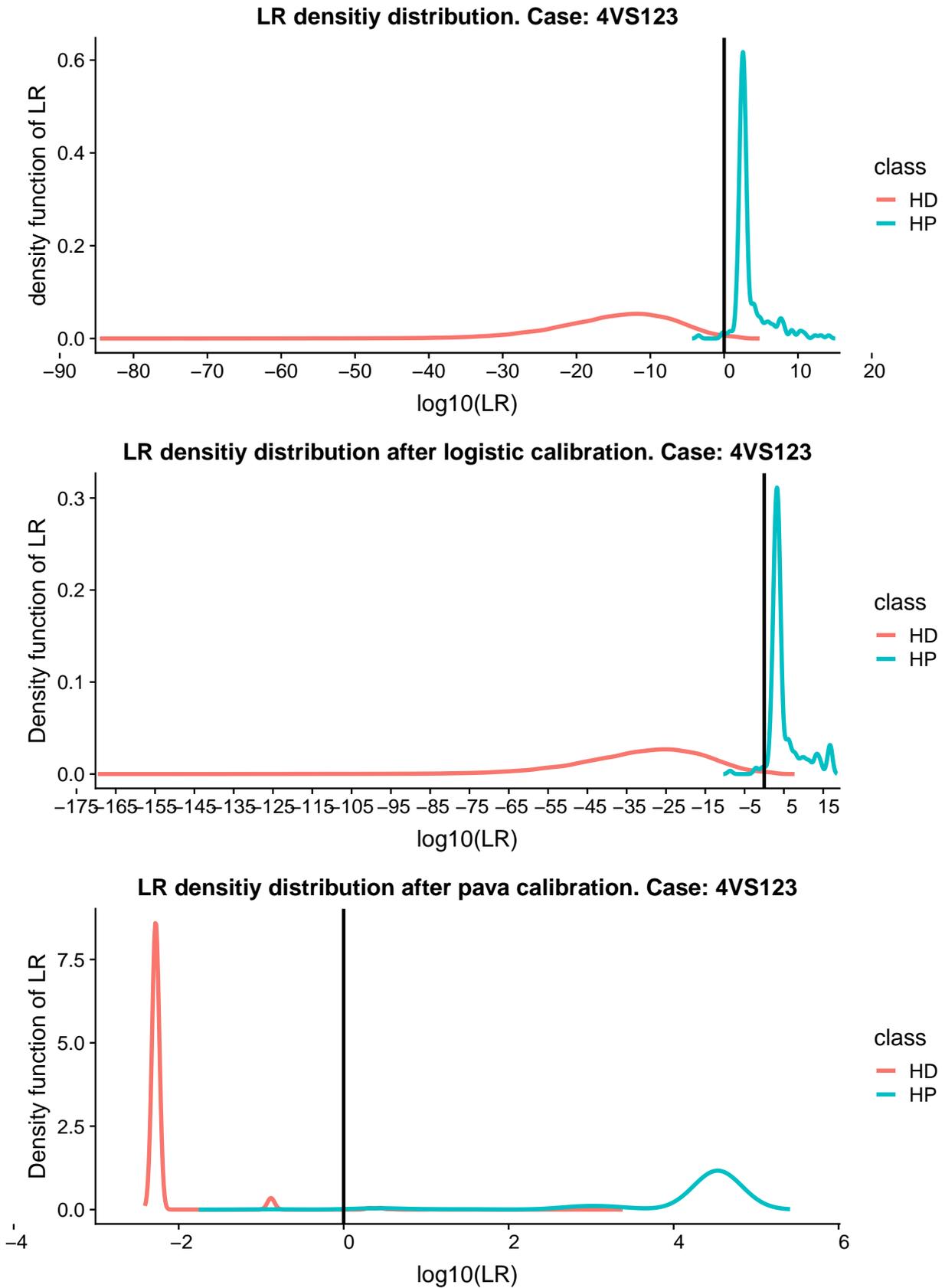


Figure 91: Distribution des densités du  $LR$ , avant et après la calibration, pour le cas  $4VS123$

### LR density distribution . Case: 4VS123

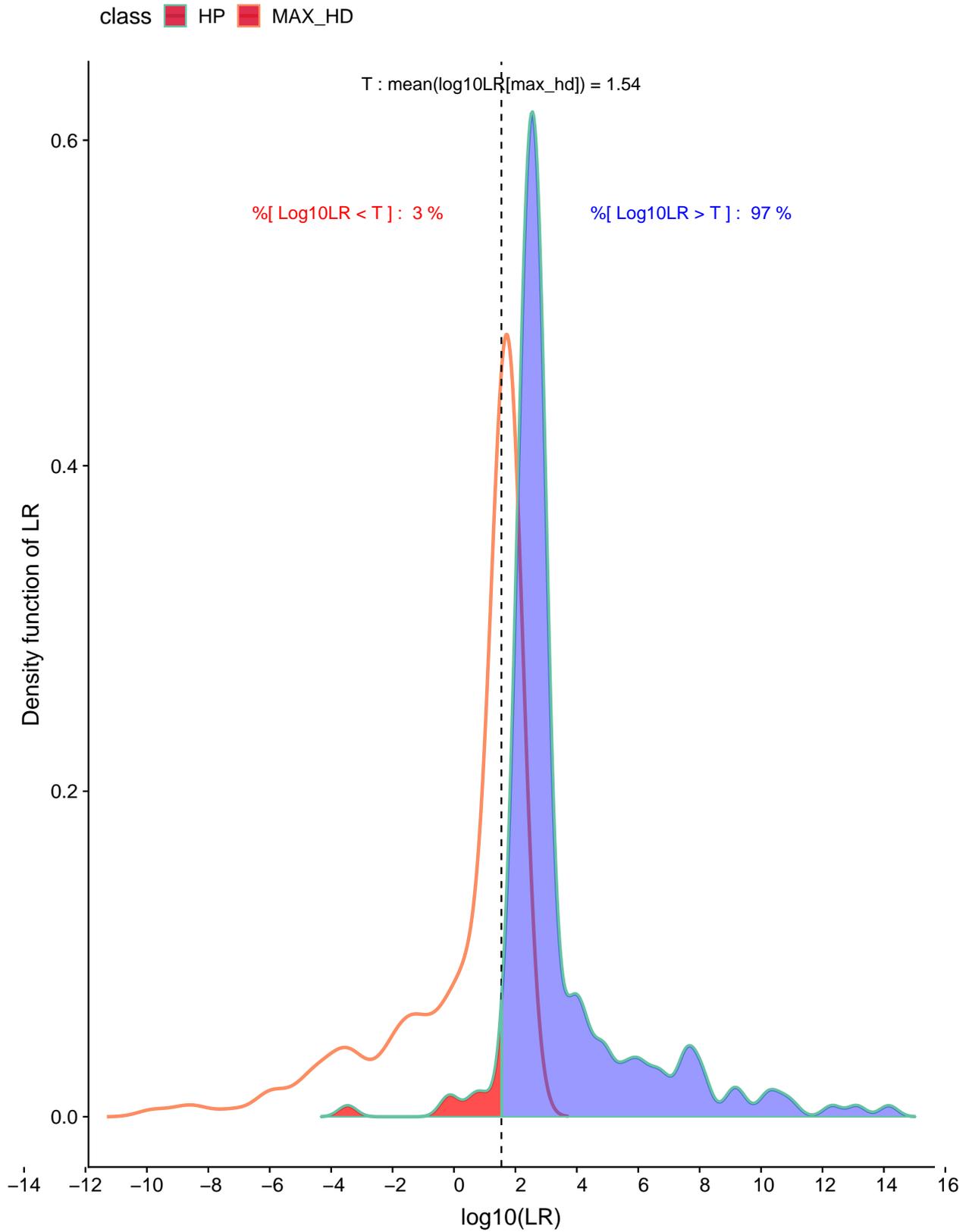


Figure 92: Distribution des densités du  $LR$ , sous  $H_p$  et son maximum sous  $H_d$ , pour le cas  $4VS123$

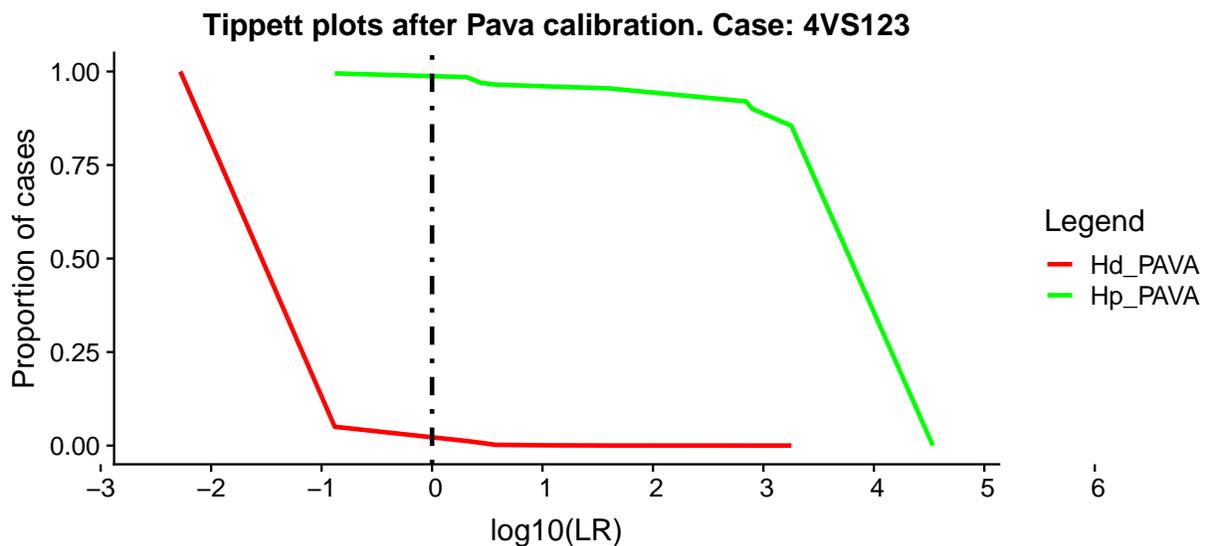
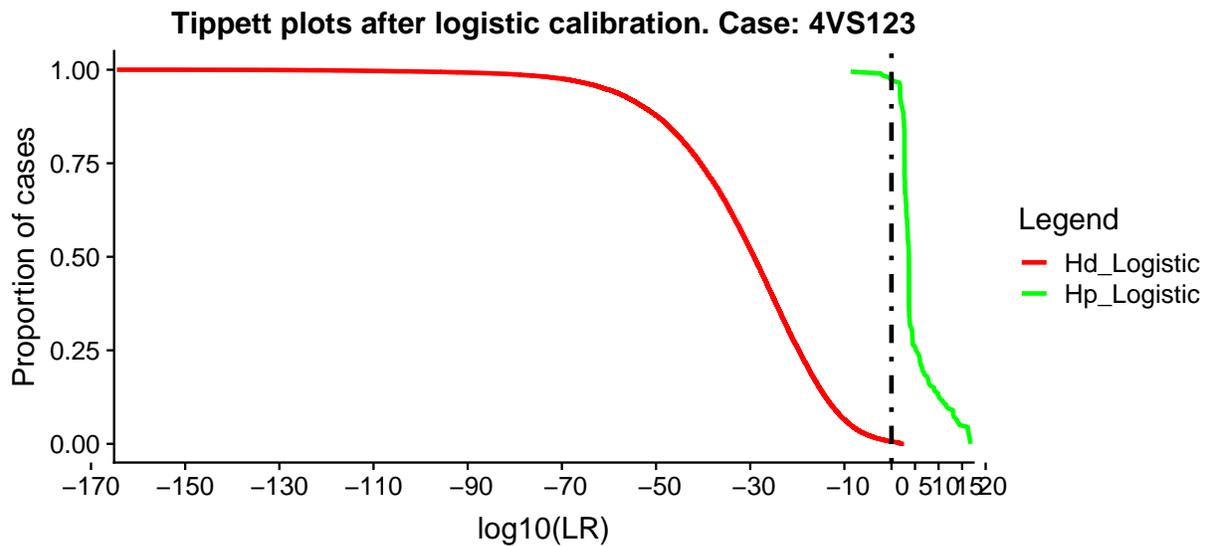
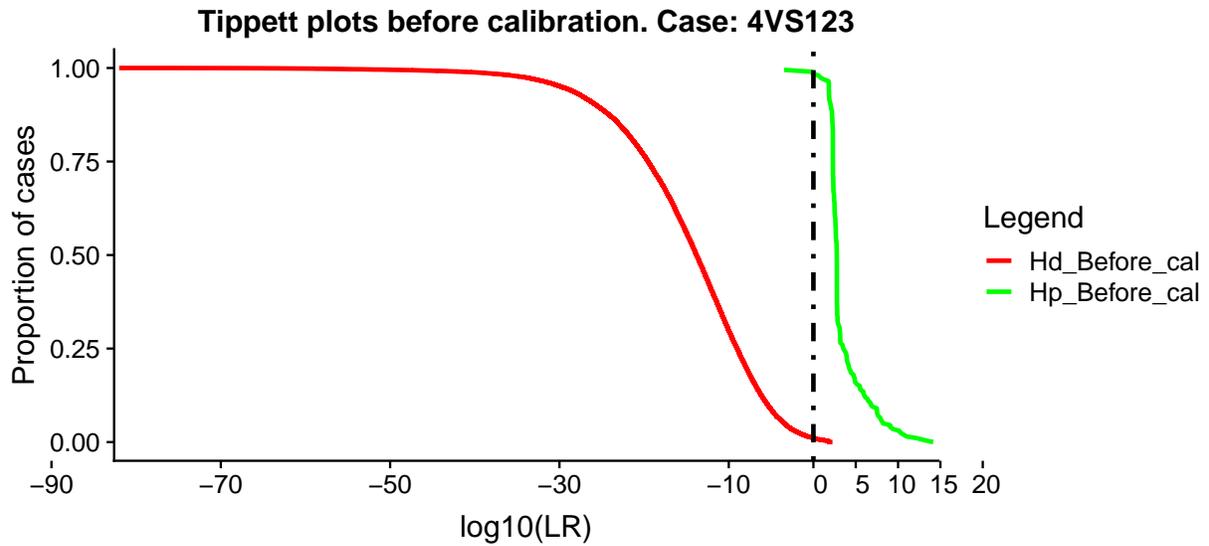


Figure 93: Courbes *Tippett* pour le cas 4VS123  
139

### DET Curves.

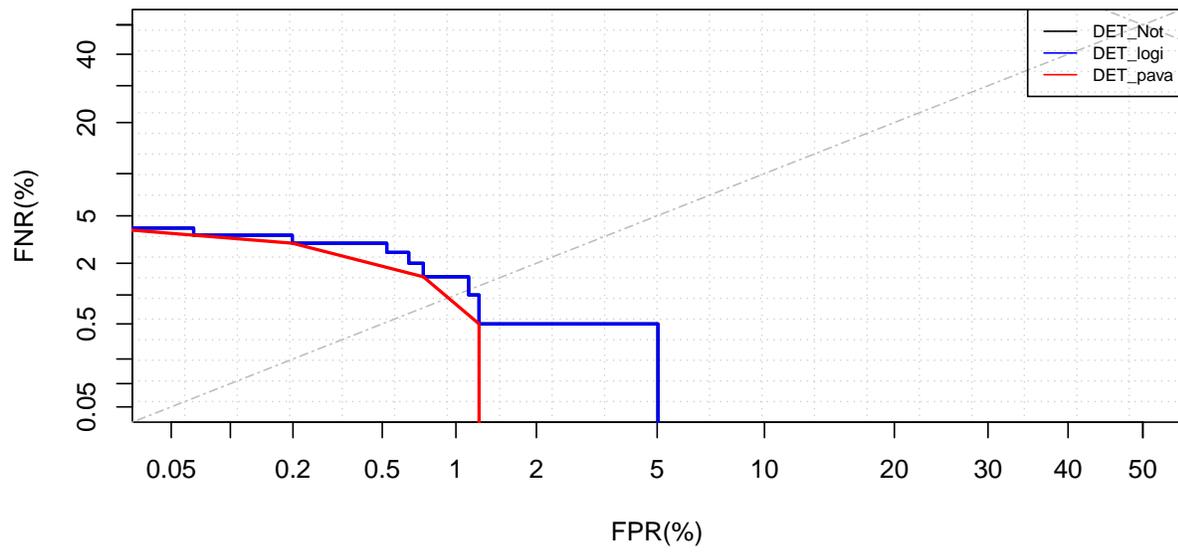


Figure 94: Courbes *DET* pour le cas *4VS123*

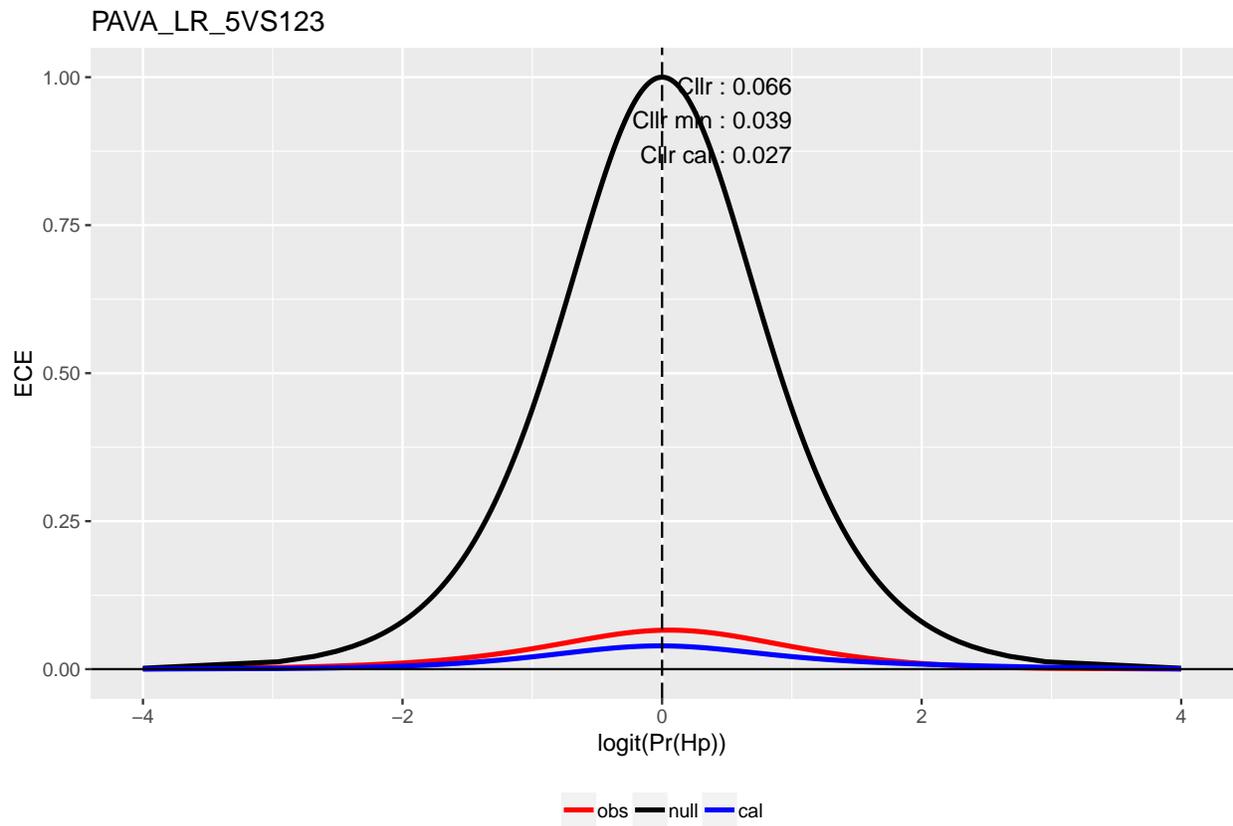
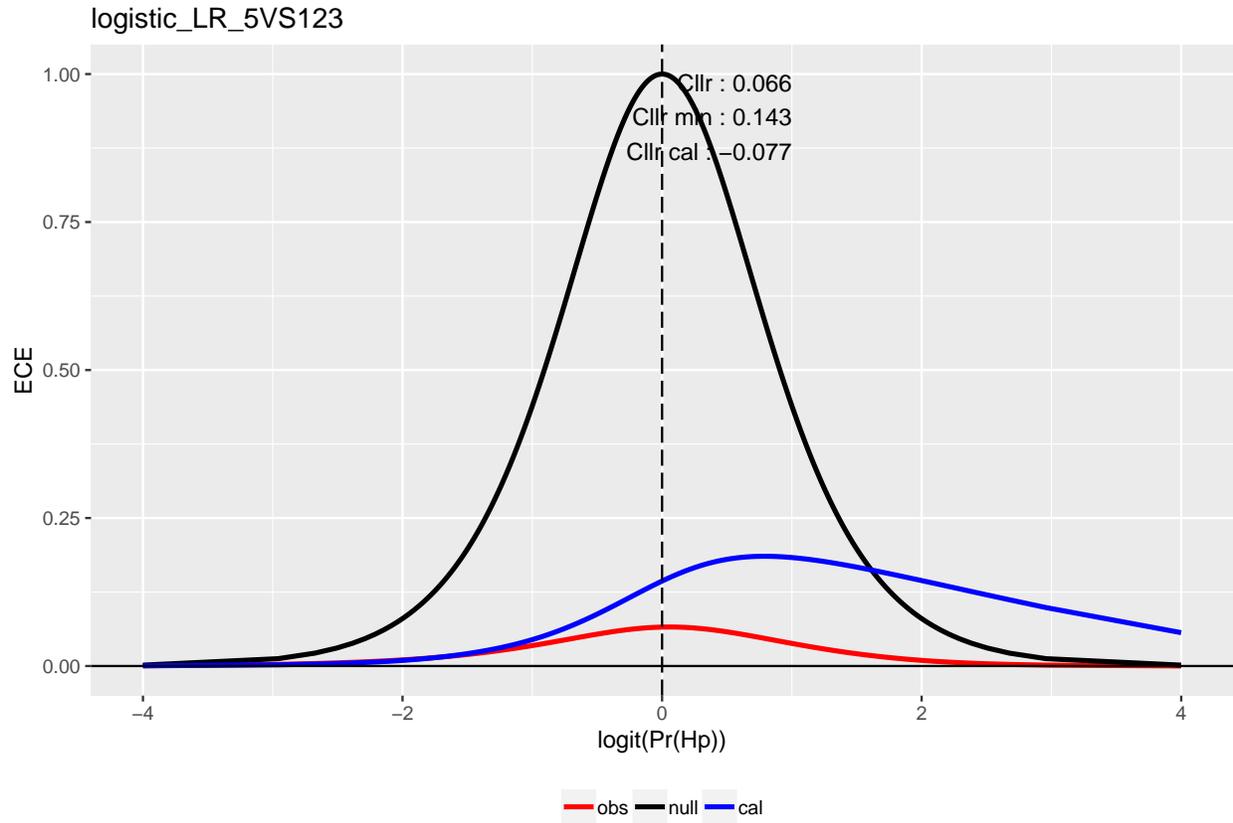


Figure 95: En haut: Courbe de calibration *ECE* obtenue par régression logistique. En bas: Courbe de calibration *ECE* obtenue par la méthode *PAVA*. 141

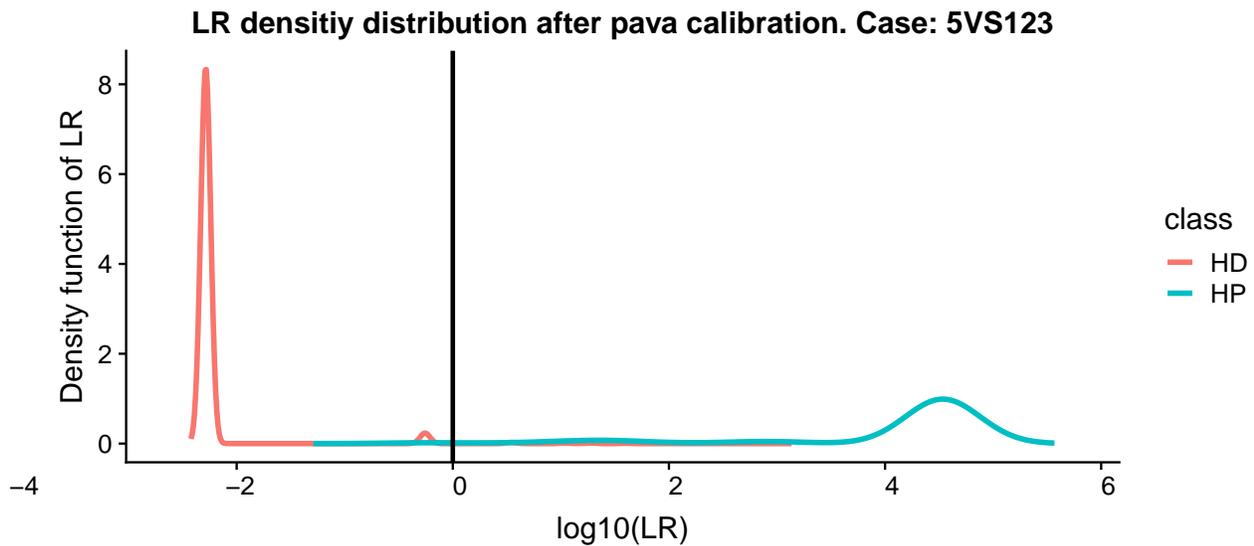
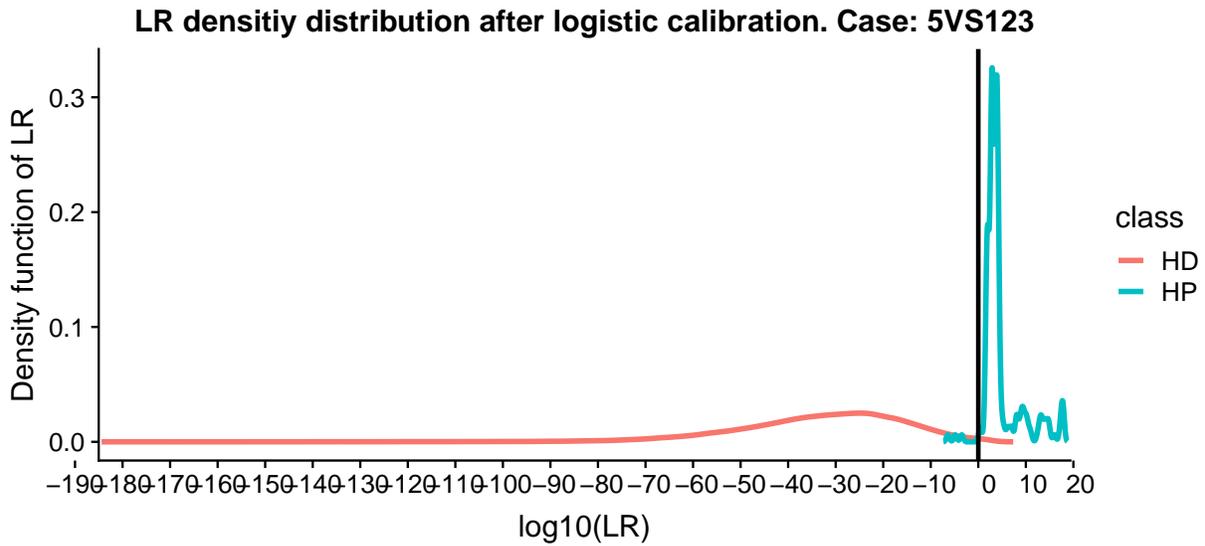
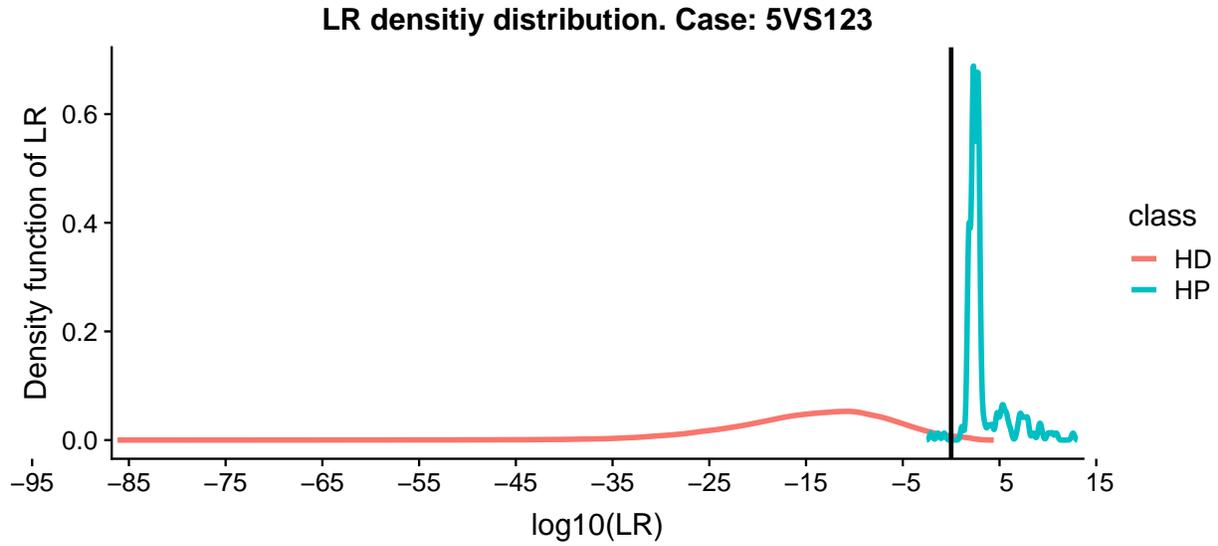


Figure 96: Distribution des densités du  $LR$ , avant et après la calibration, pour le cas  $5VS123$

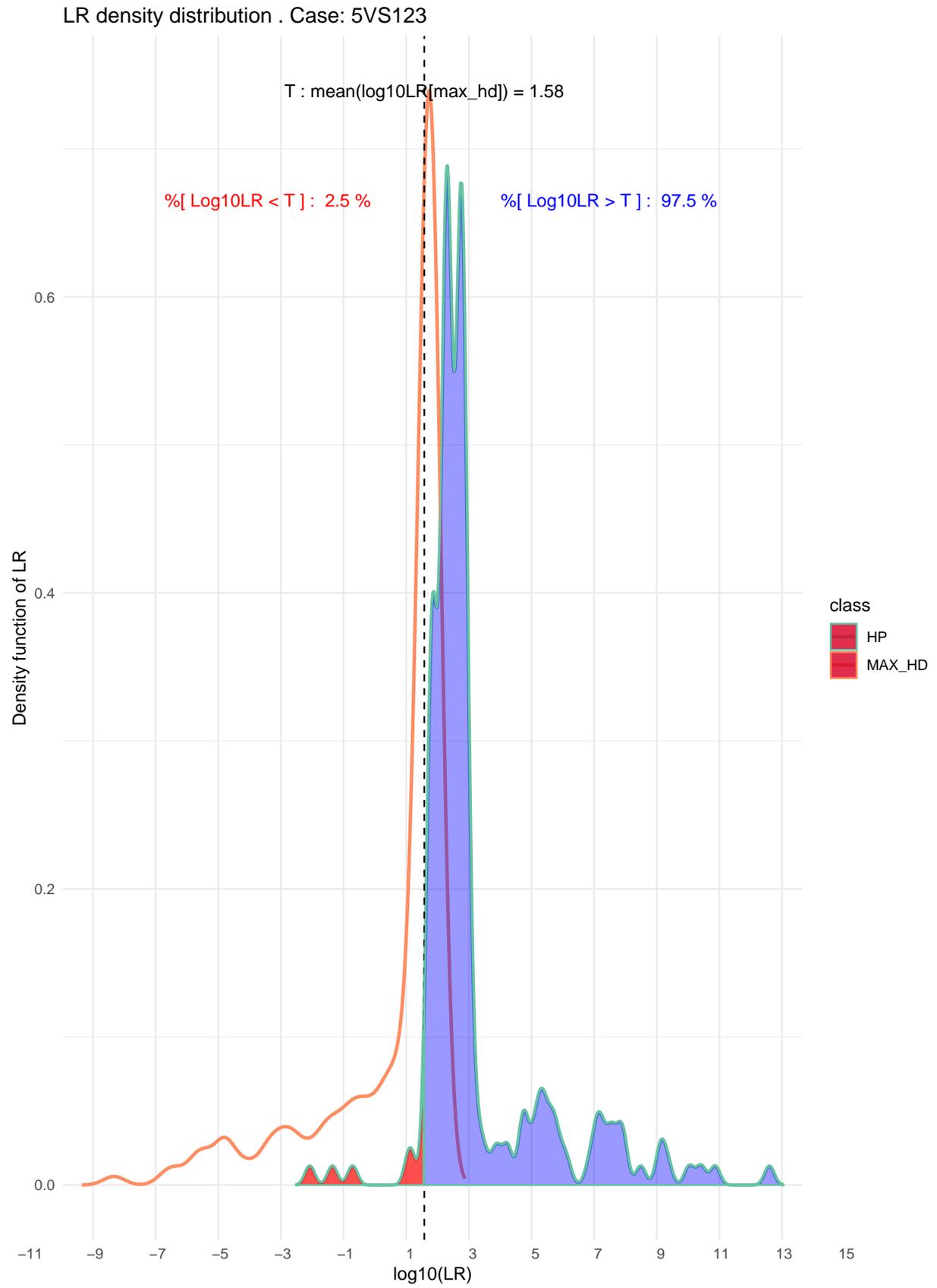


Figure 97: Distribution des densités du  $LR$ , sous  $H_p$  et son maximum sous  $H_d$ , pour le cas 5VS123

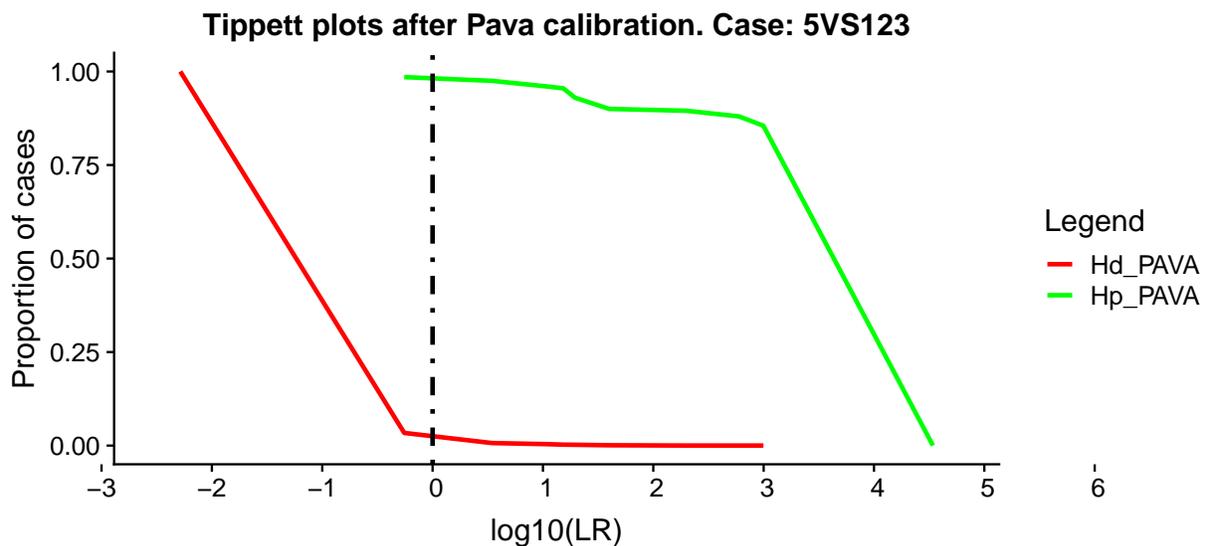
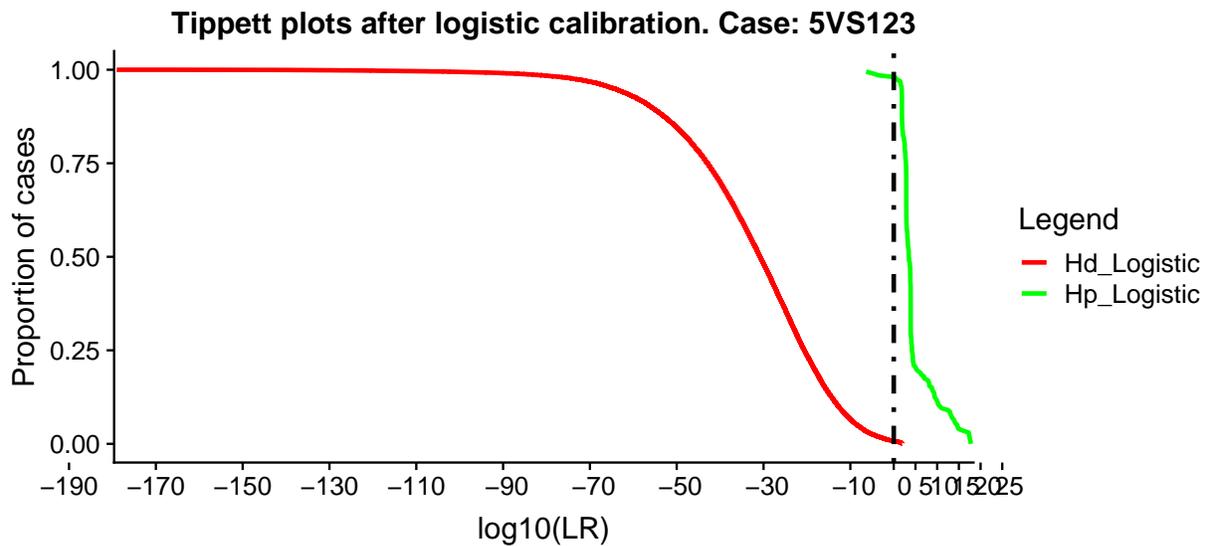
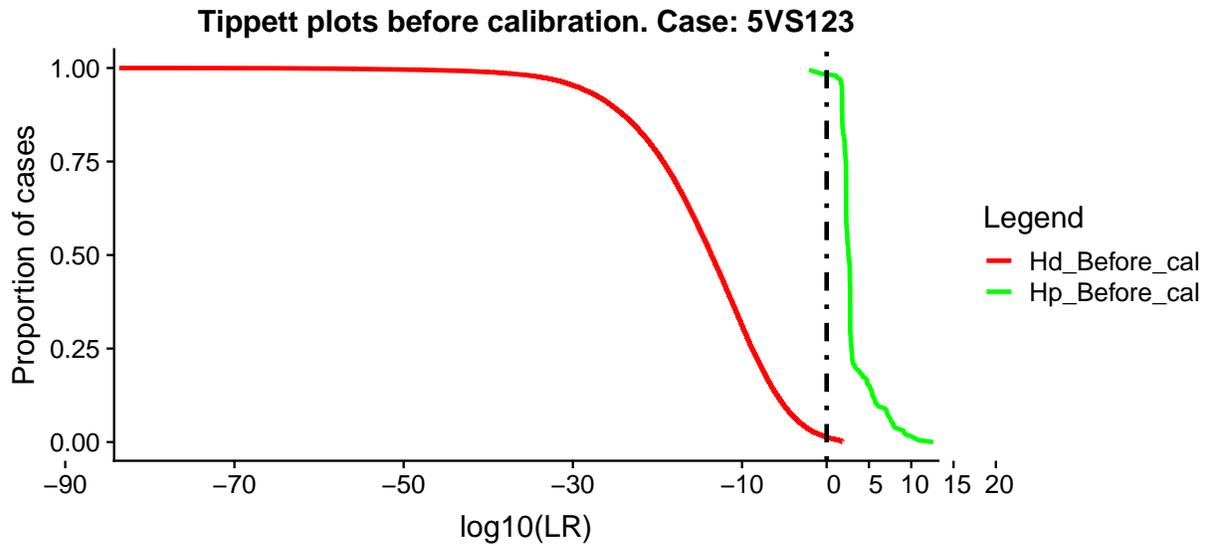


Figure 98: Courbes *Tippett* pour le cas 5VS123  
144

### DET Curves.

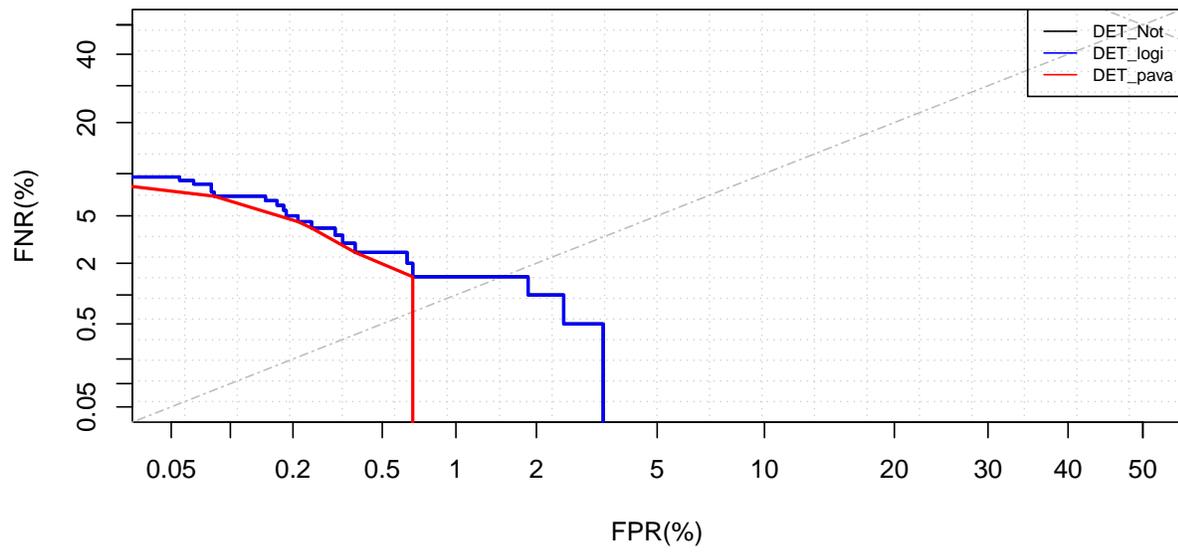


Figure 99: Courbes *DET* pour le cas *5VS123*

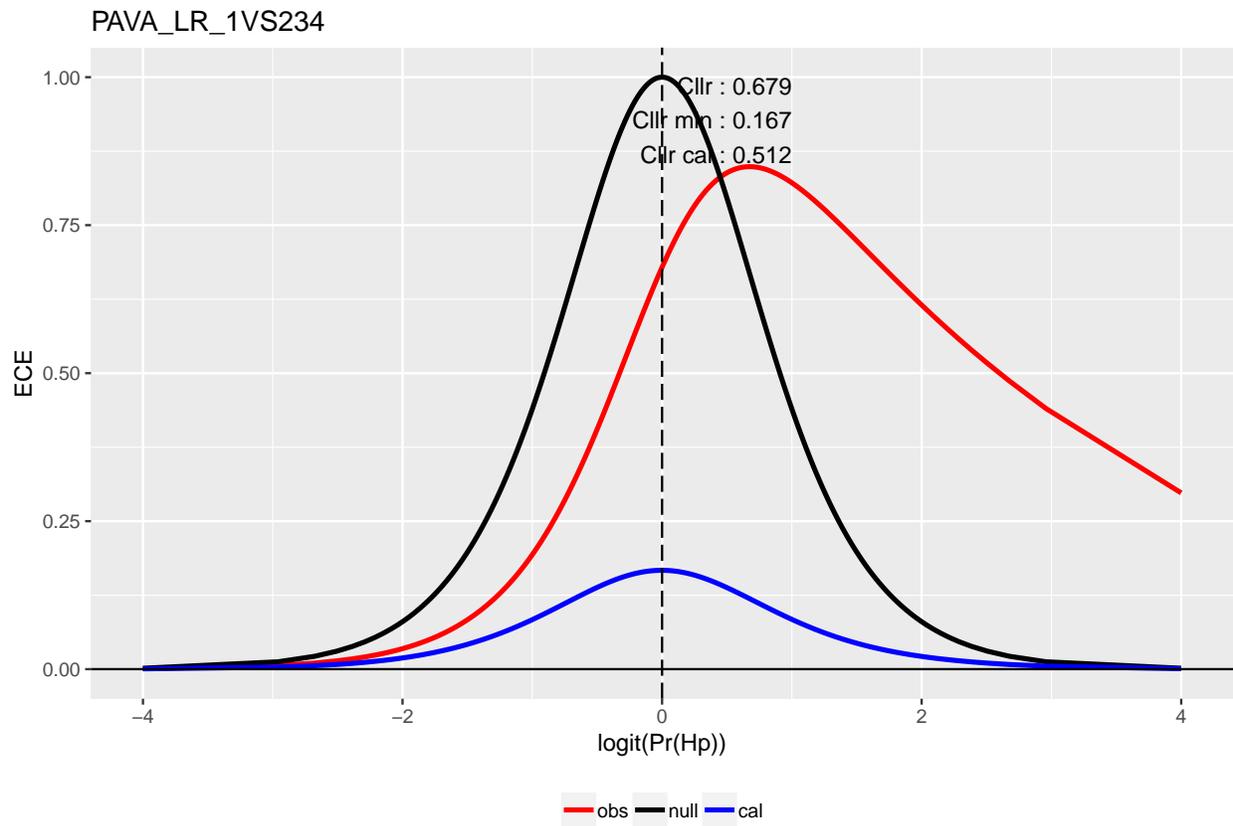
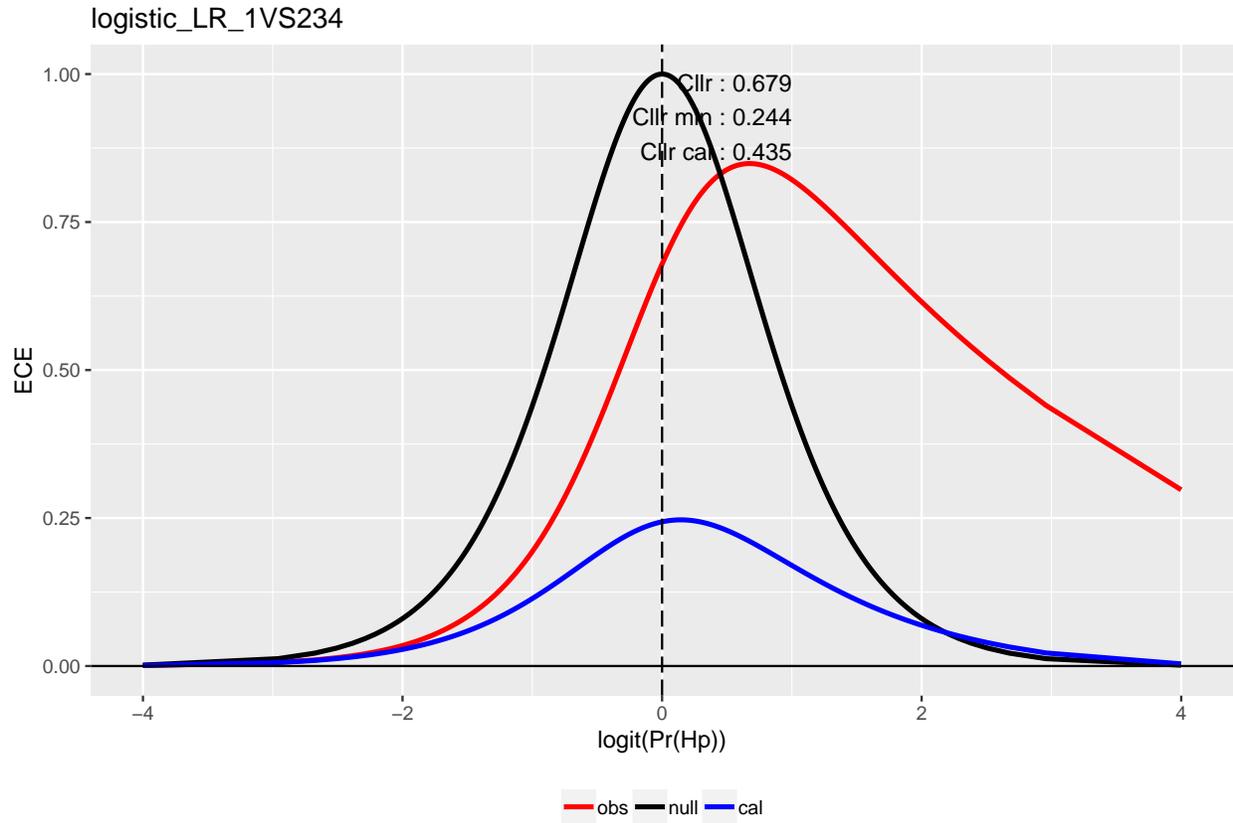


Figure 100: En haut: Courbe de calibration *ECE* obtenue par régression logistique. En bas: Courbe de calibration *ECE* obtenue par la méthode *PAVA*. 146

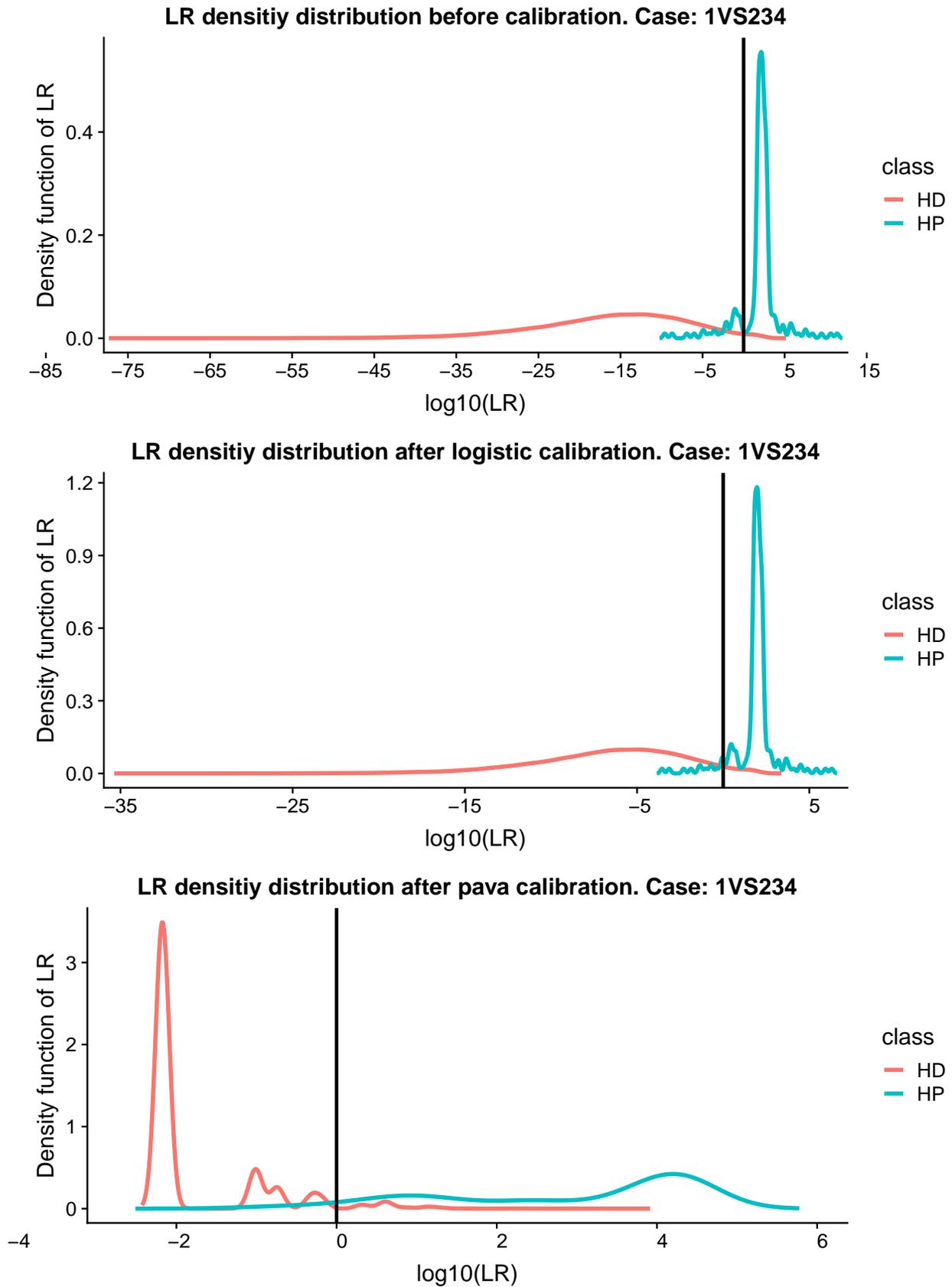


Figure 101: Distribution des densités du  $LR$ , avant et après la calibration, pour le cas  $1VS234$

### LR density distribution . Case: 1VS234

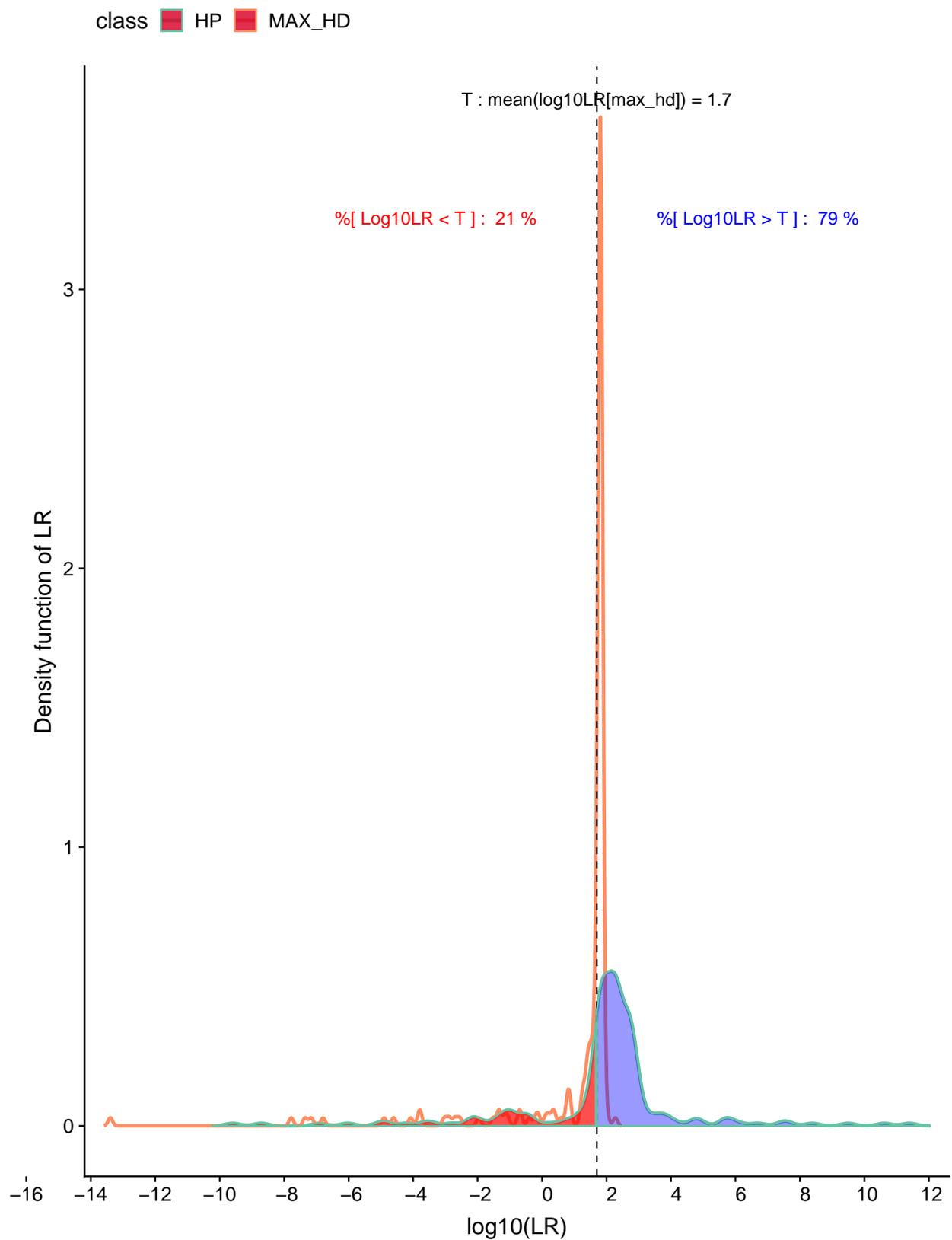


Figure 102: Distribution des densités du  $LR$ , sous  $H_p$  et son maximum sous  $H_d$ , pour le cas  $1VS234$

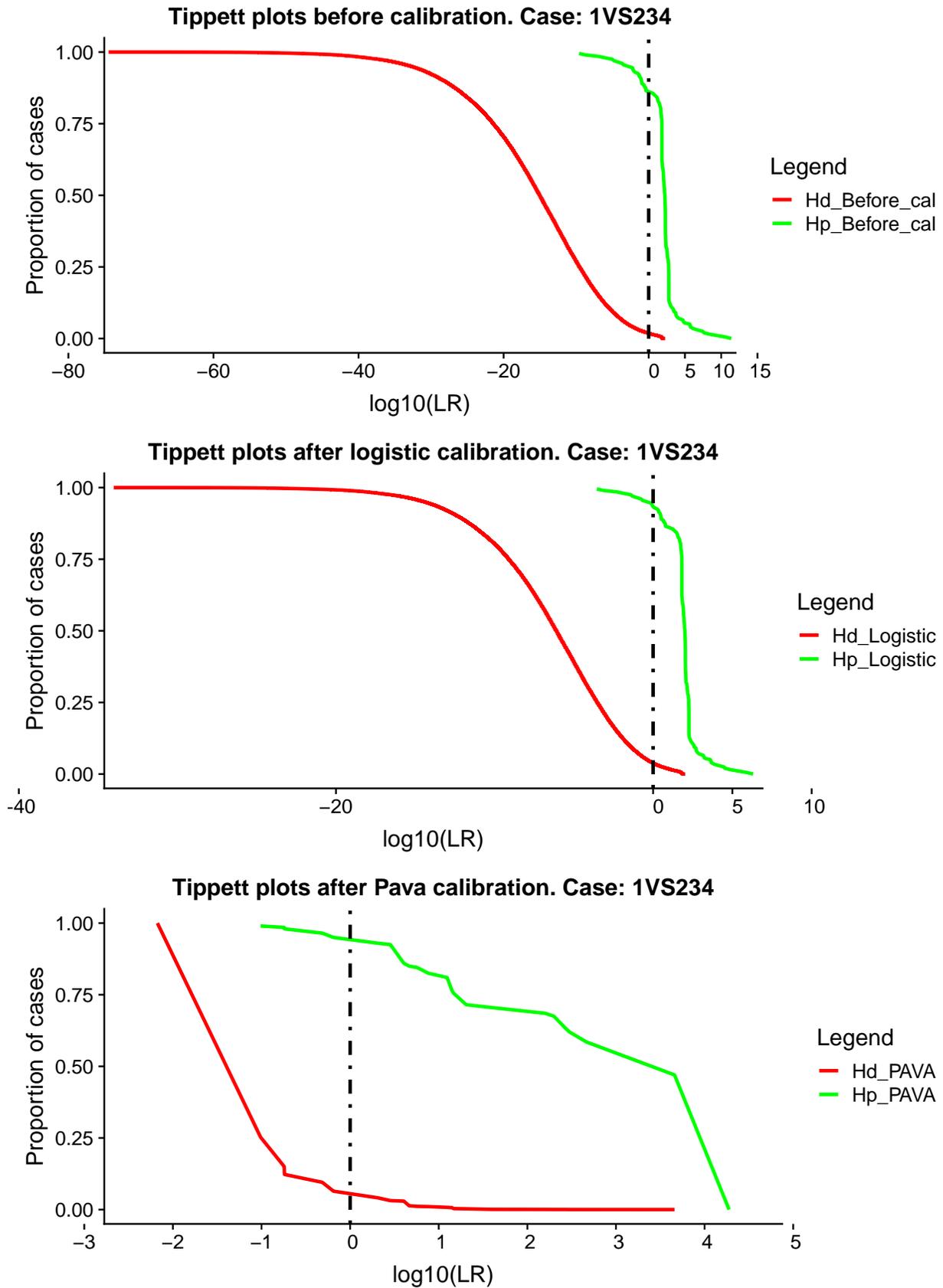


Figure 103: Courbes *Tippett* pour le cas 1VS234

### DET Curves.

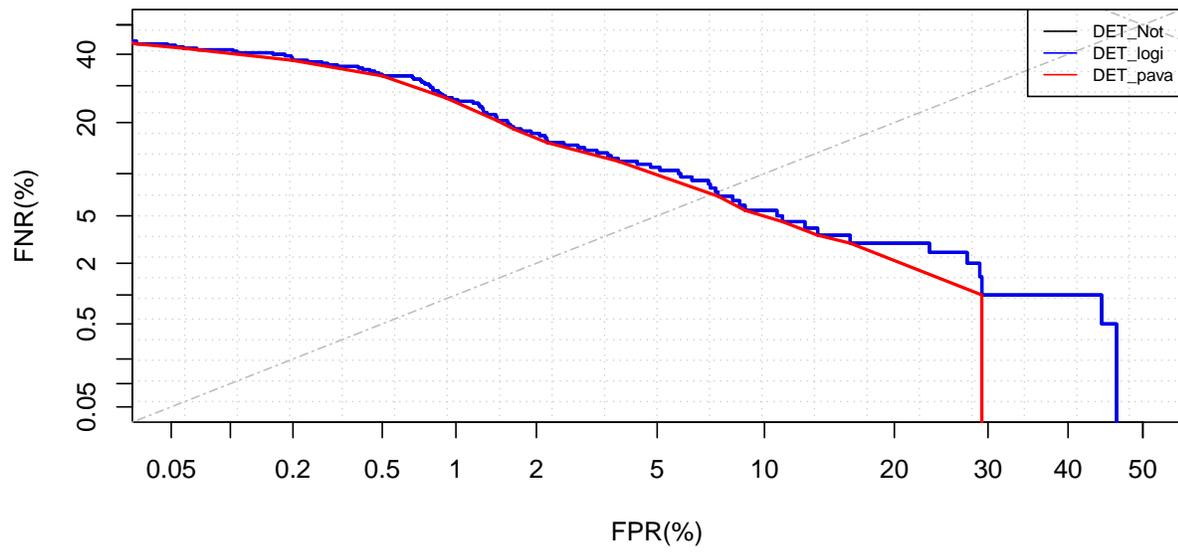


Figure 104: Courbes *DET* pour le cas *1VS234*

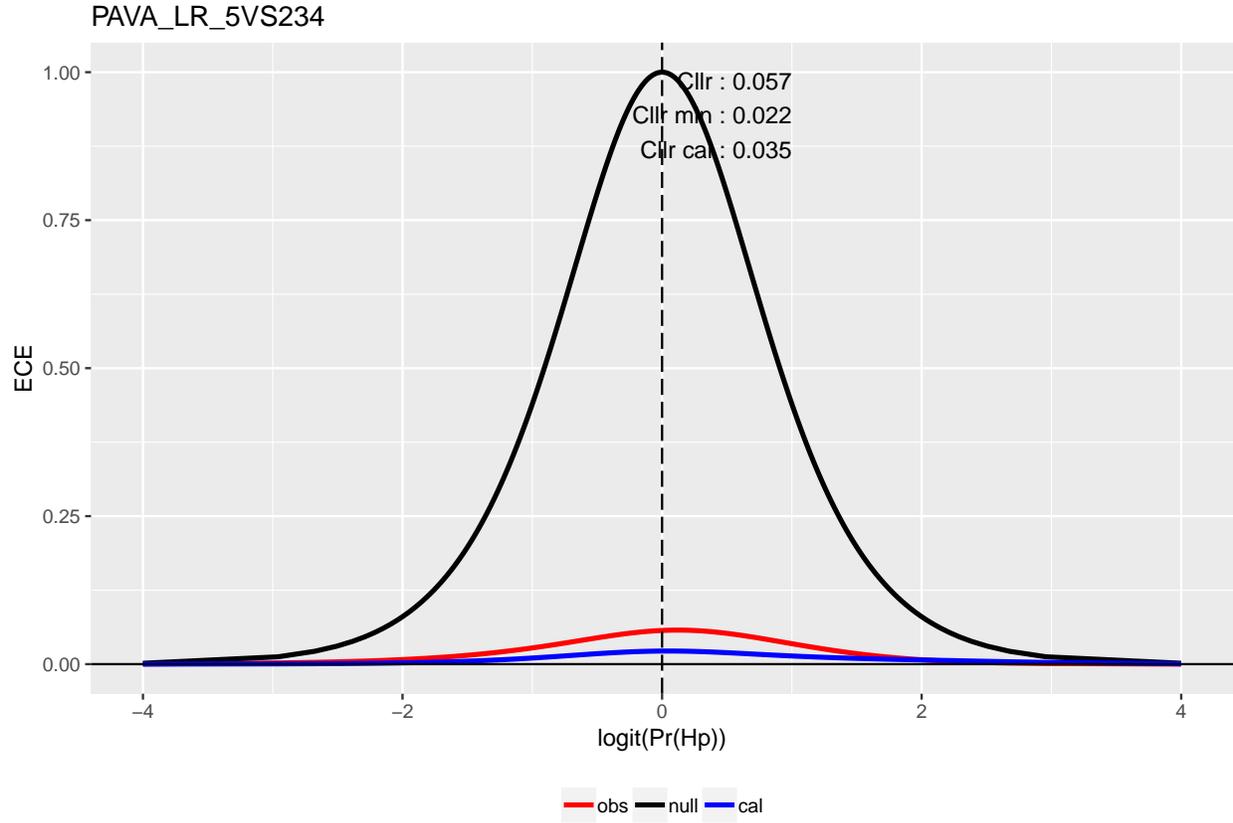
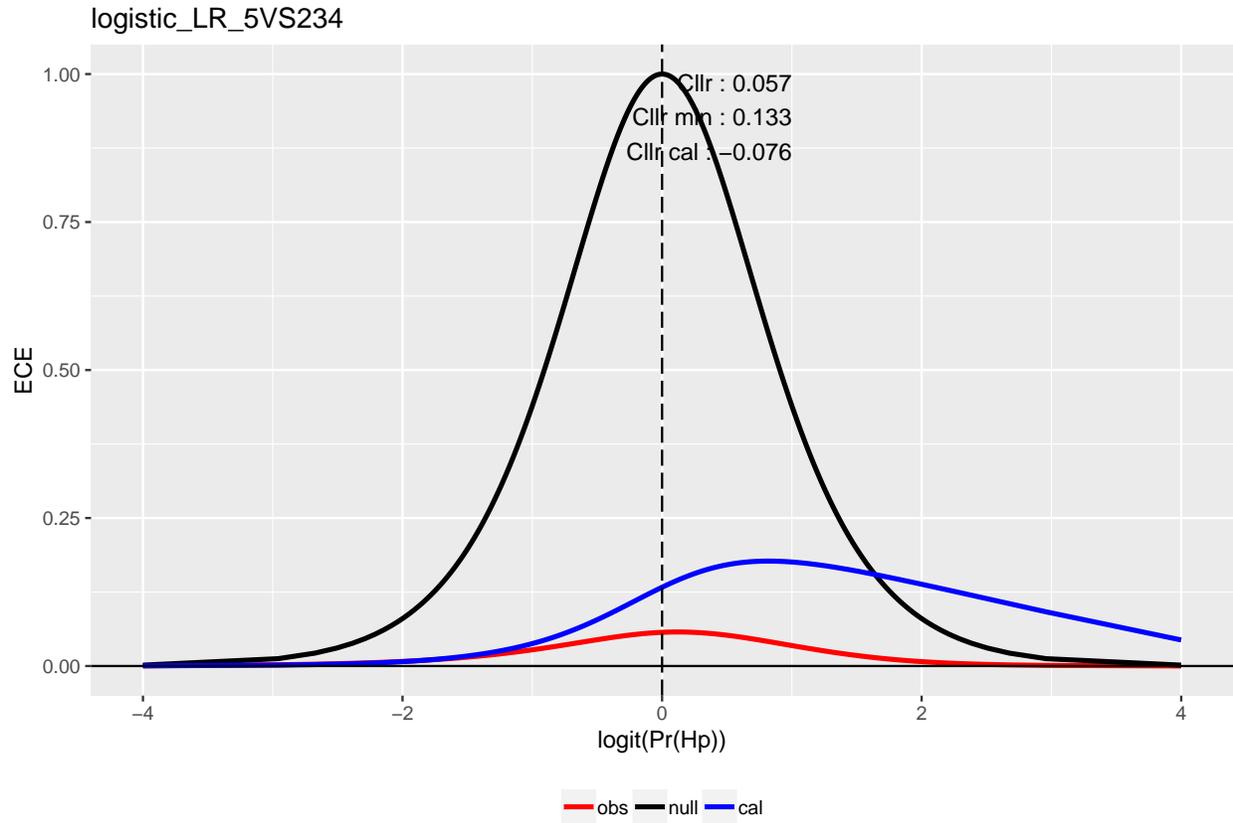


Figure 105: En haut: Courbe de calibration *ECE* obtenue par régression logistique. En bas: Courbe de calibration *ECE* obtenue par la méthode *PAVA*. 151

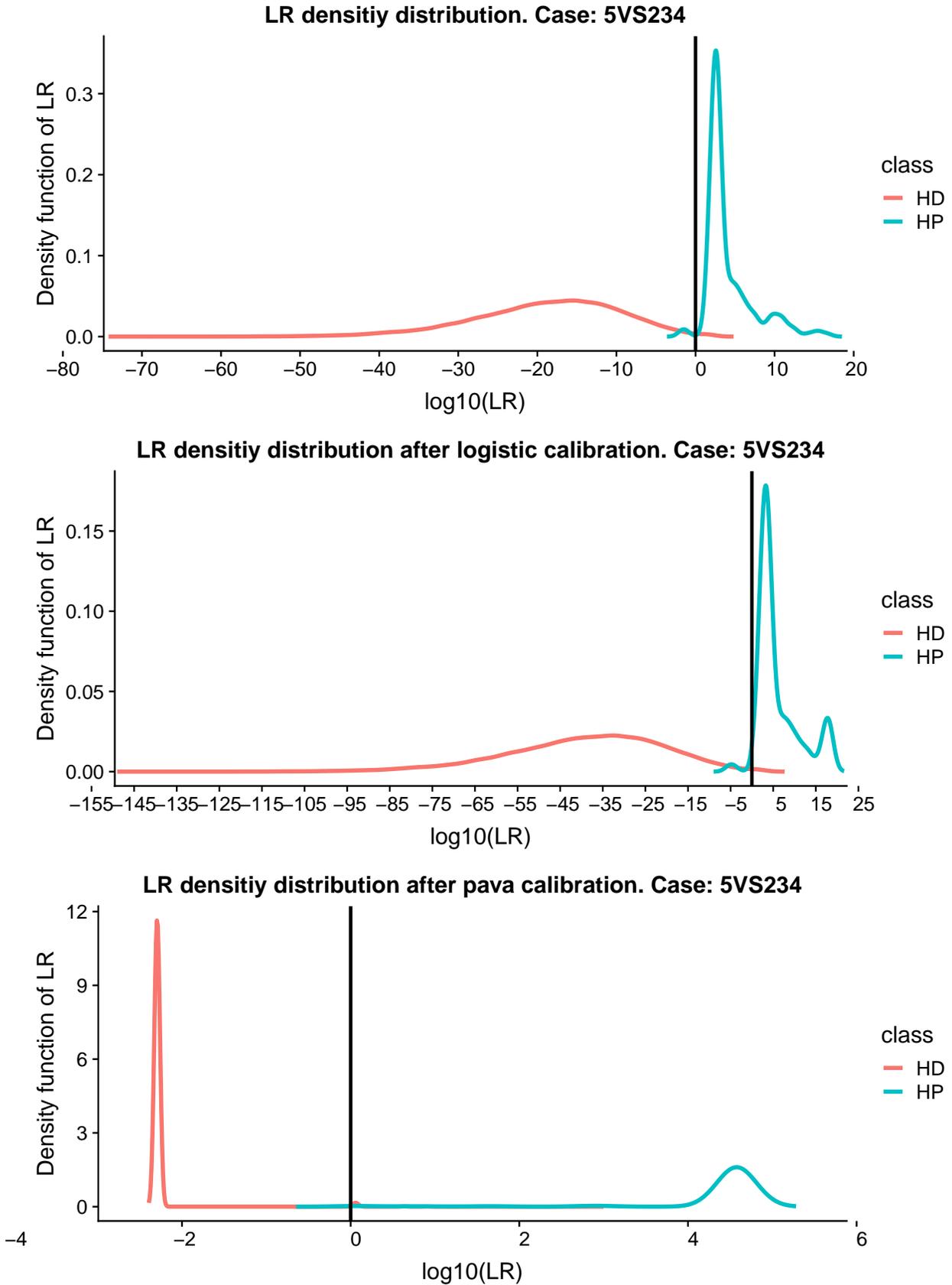


Figure 106: Distribution des densités du  $LR$ , avant et après la calibration, pour le cas  $5VS234$

### LR density distribution . Case: 5VS234

class ■ HP ■ MAX\_HD

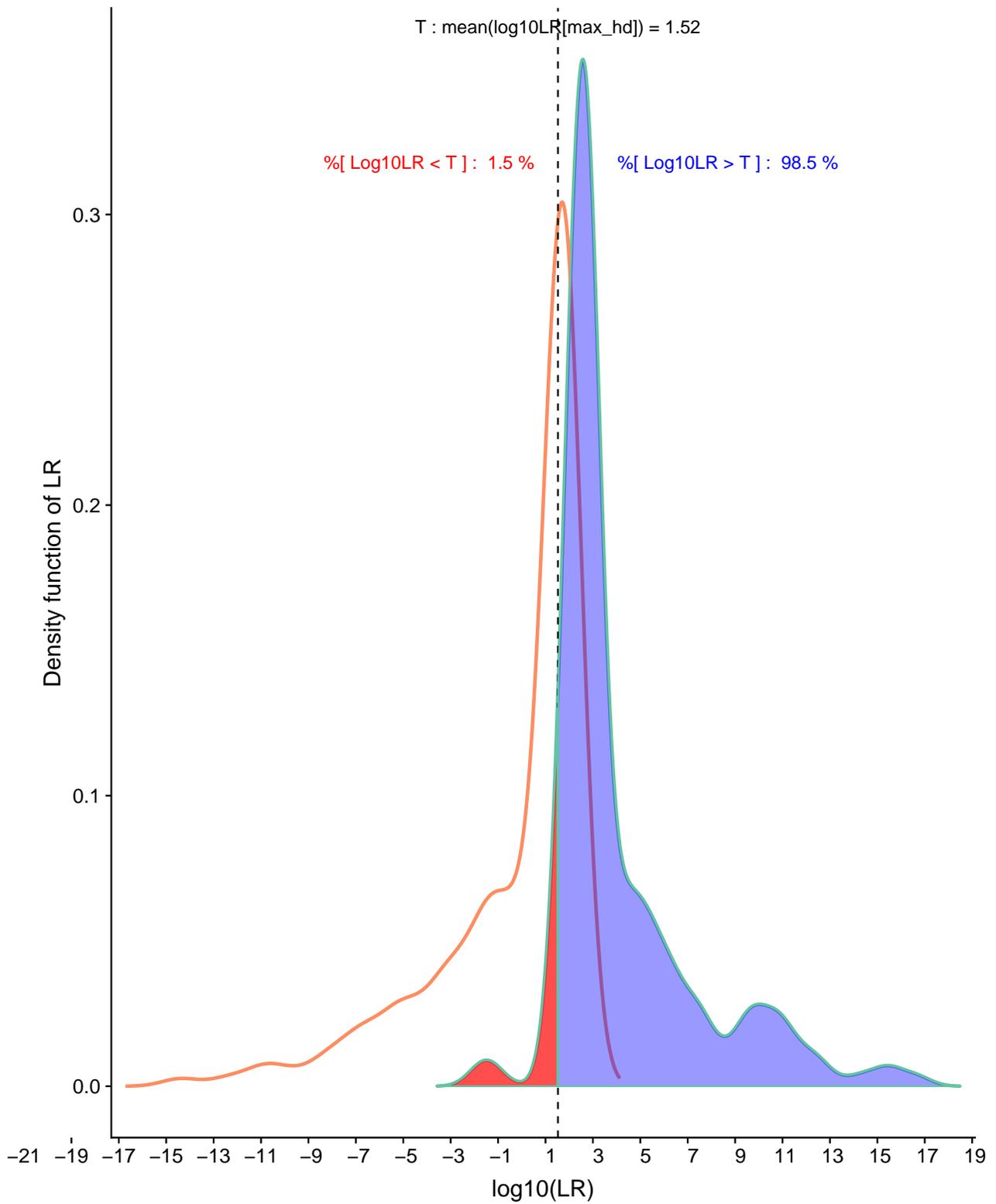


Figure 107: Distribution des densités du  $LR$ , sous  $H_p$  et son maximum sous  $H_d$ , pour le cas  $5VS234$

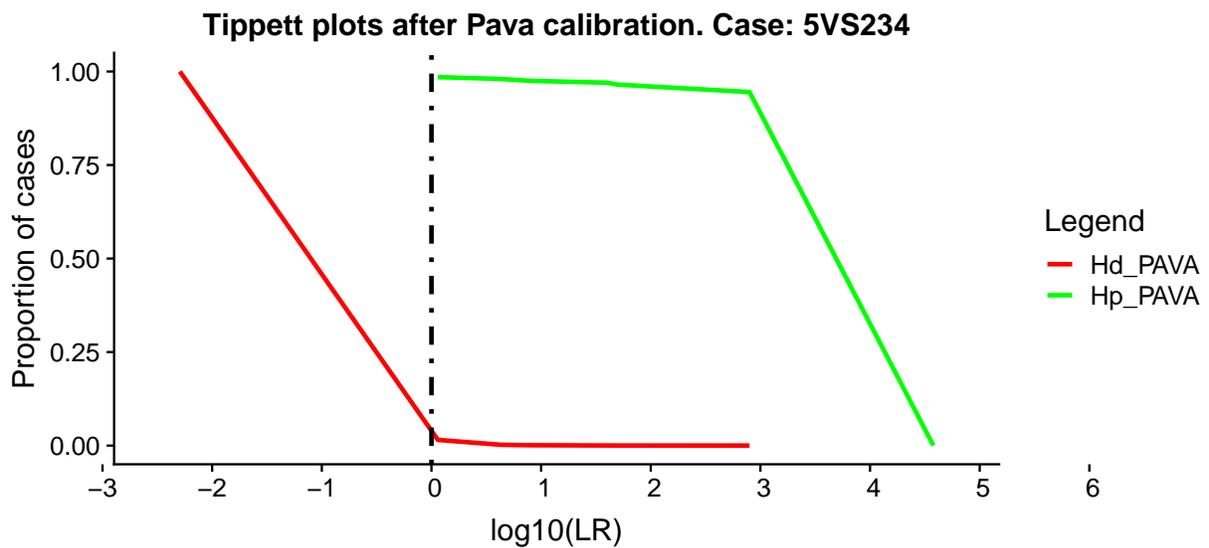
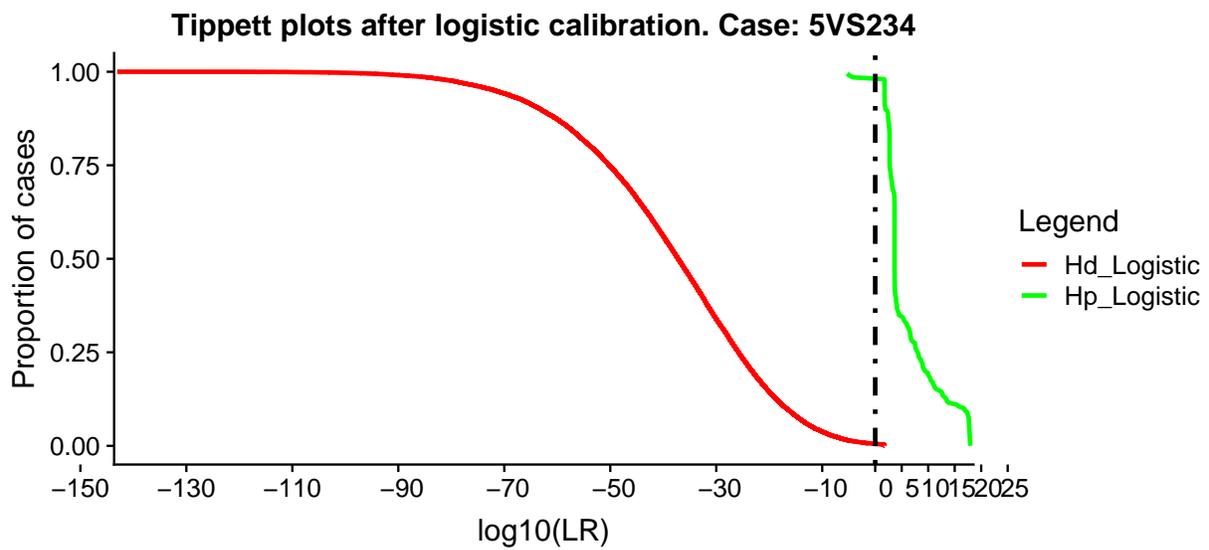
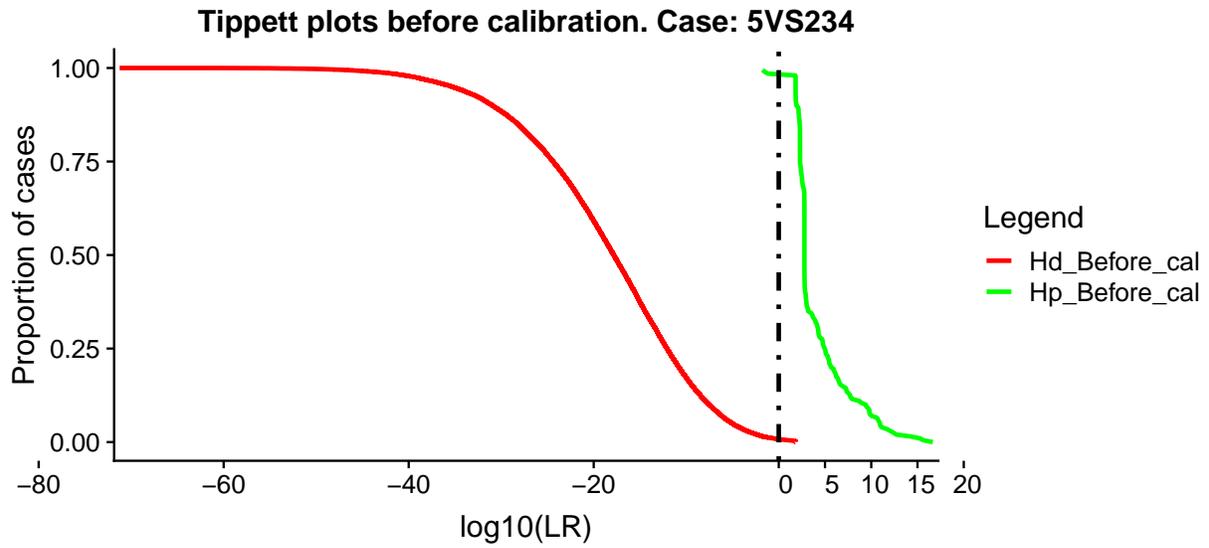


Figure 108: Courbes *Tippett* pour le cas 5VS234

### DET Curves.

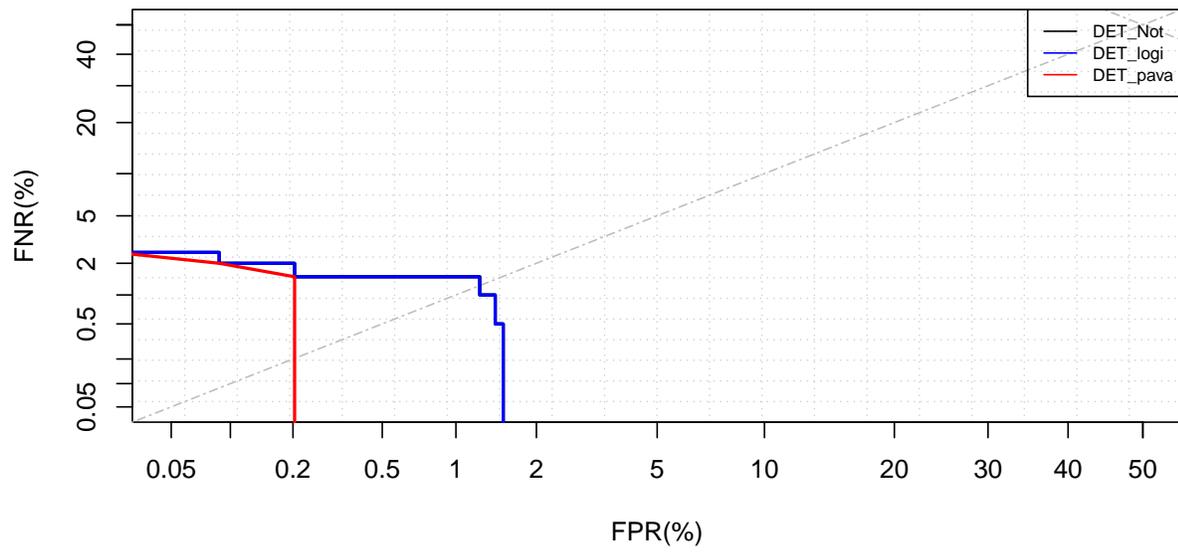


Figure 109: Courbes *DET* pour le cas *5VS234*

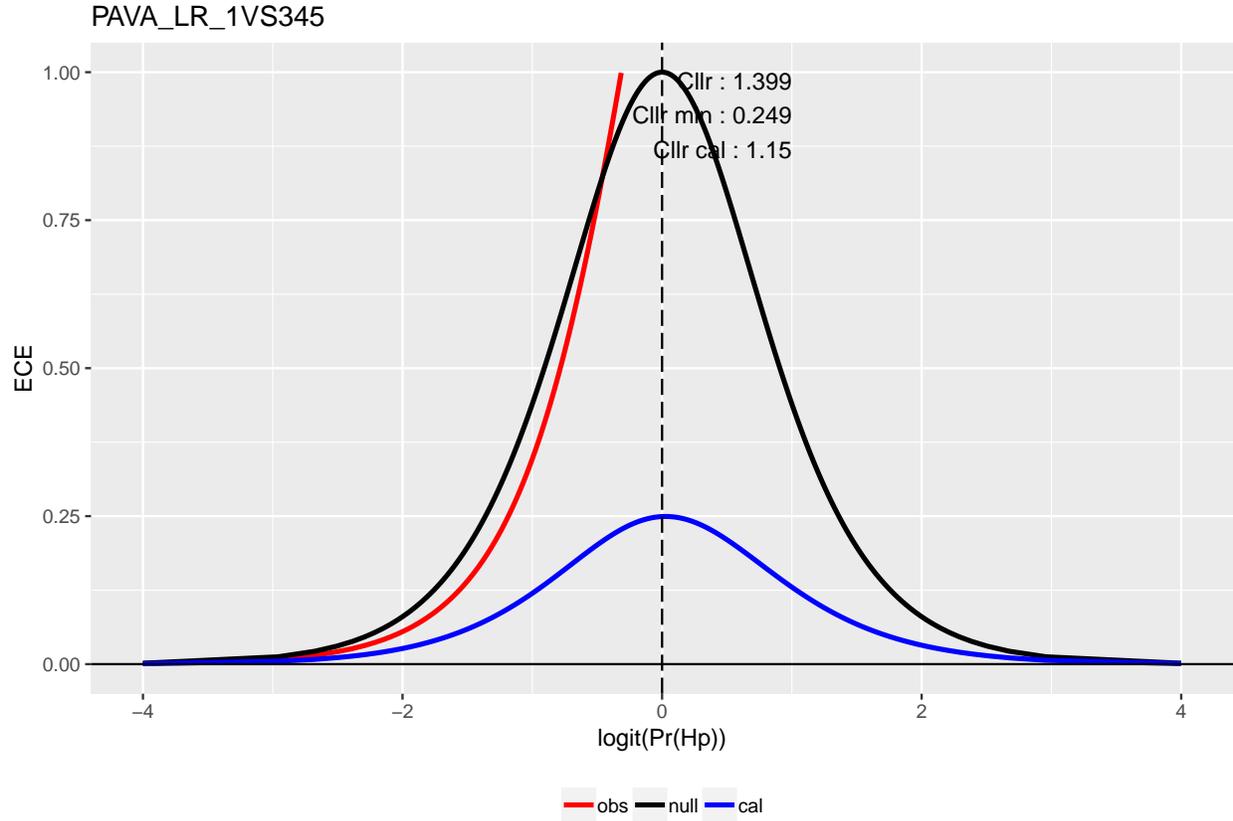
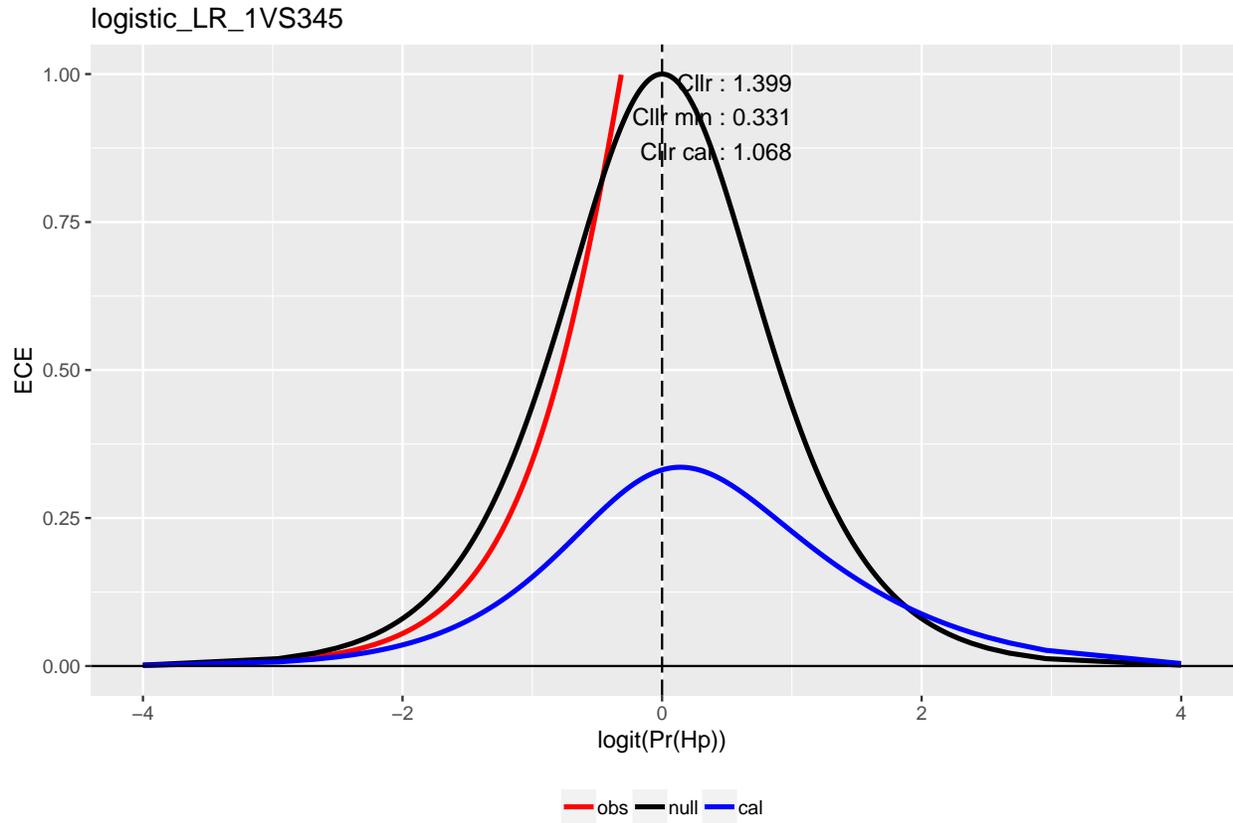


Figure 110: En haut: Courbe de calibration *ECE* obtenue par régression logistique. En bas: Courbe de calibration *ECE* obtenue par la méthode *PAVA*. 156

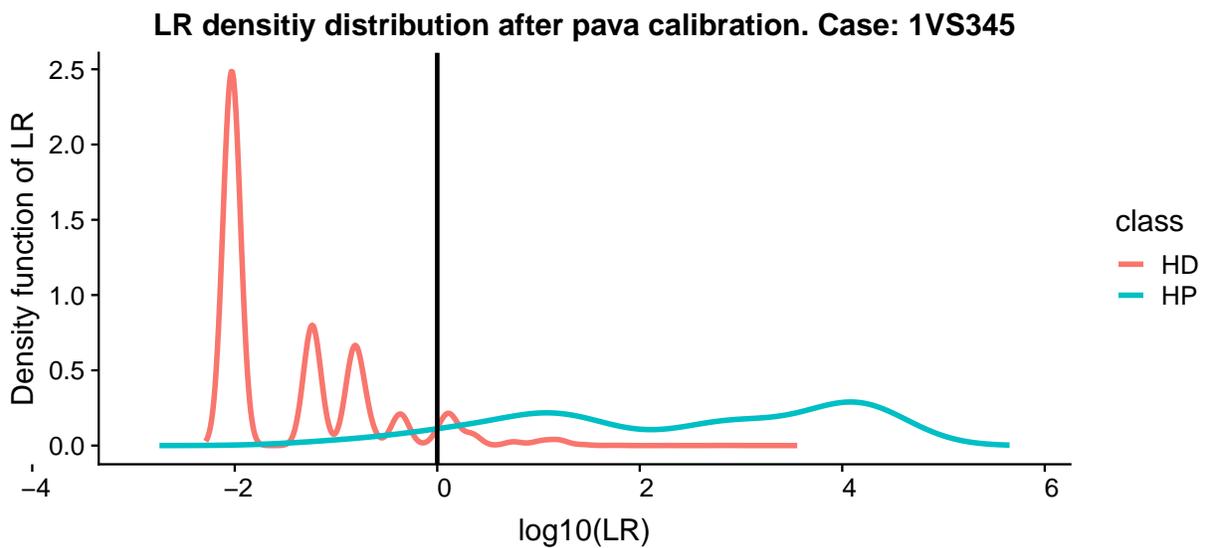
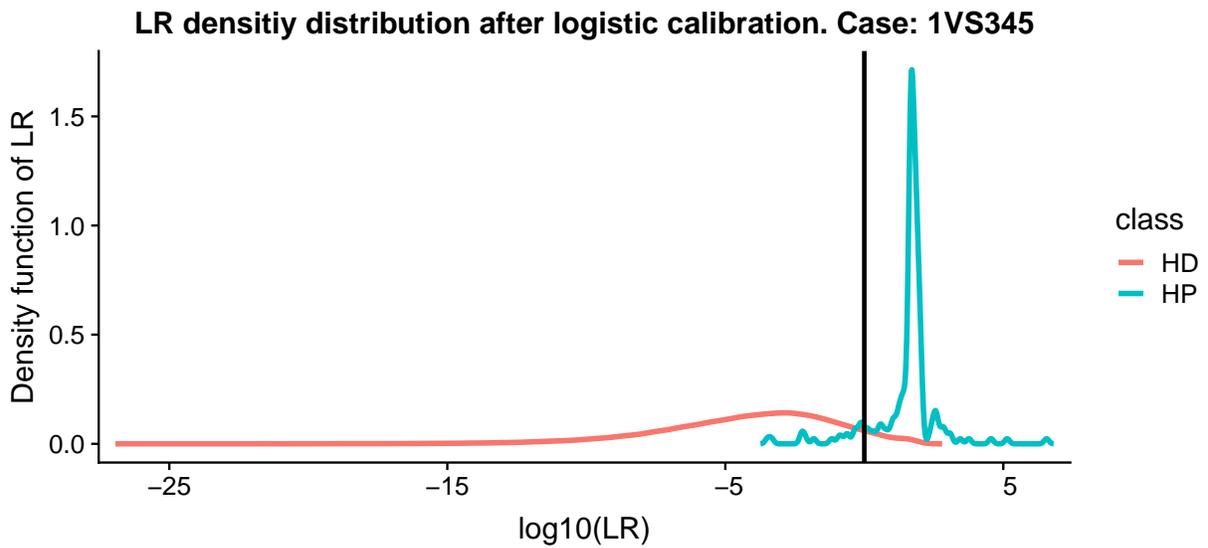
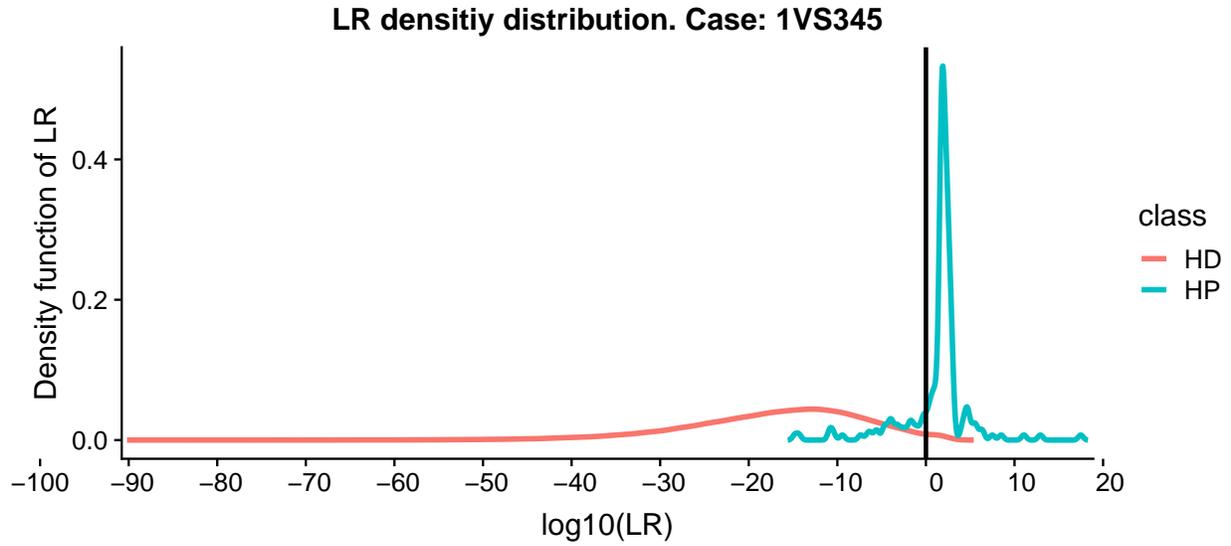


Figure 111: Distribution des densités du  $LR$ , avant et après la calibration, pour le cas  $1VS345$

### LR density distribution . Case: 1VS345

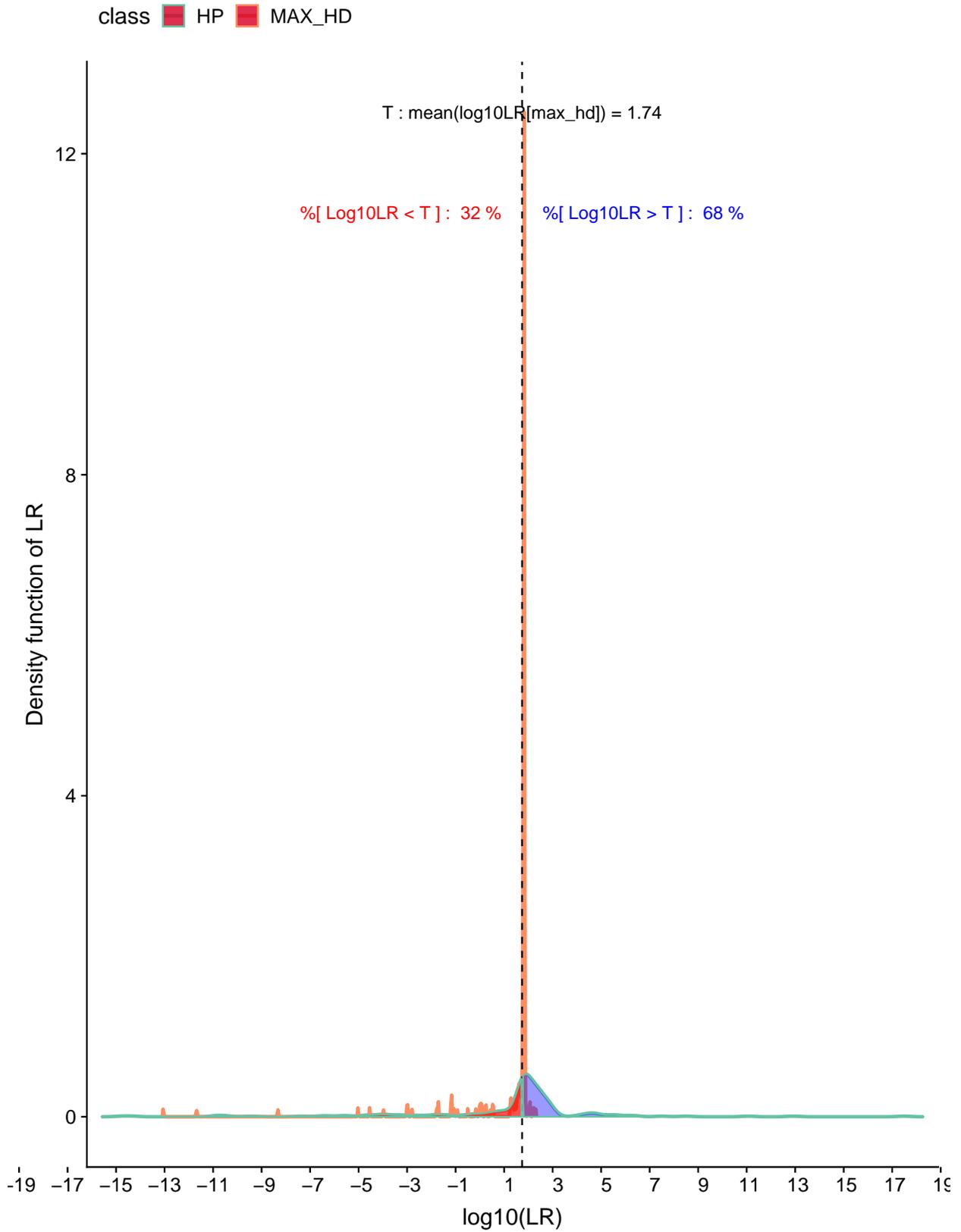


Figure 112: Distribution des densités du  $LR$ , sous  $H_p$  et son maximum sous  $H_d$ , pour le cas  $1VS345$

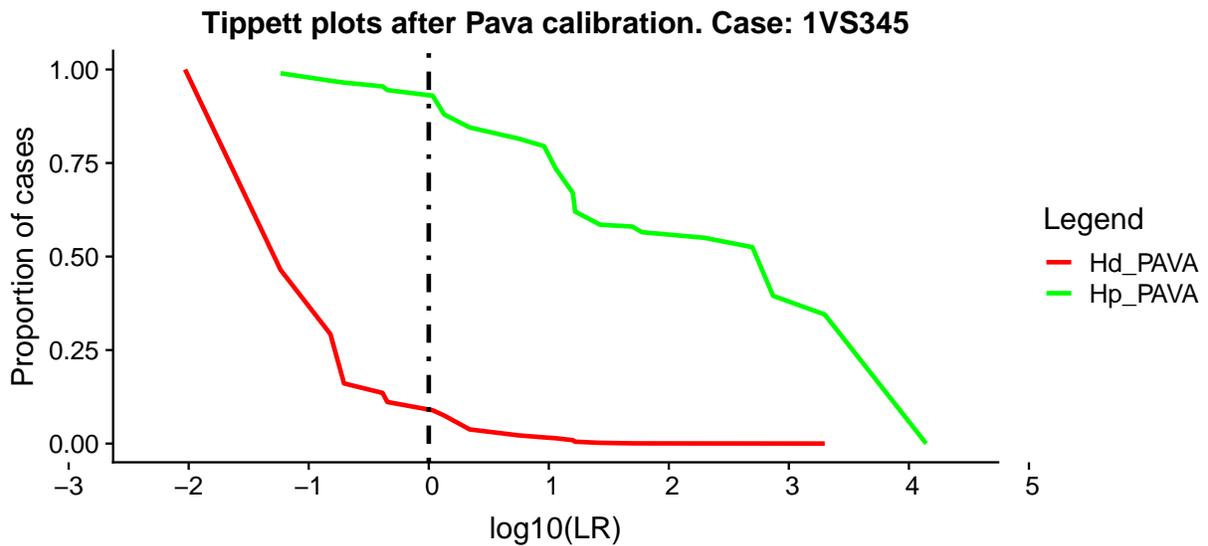
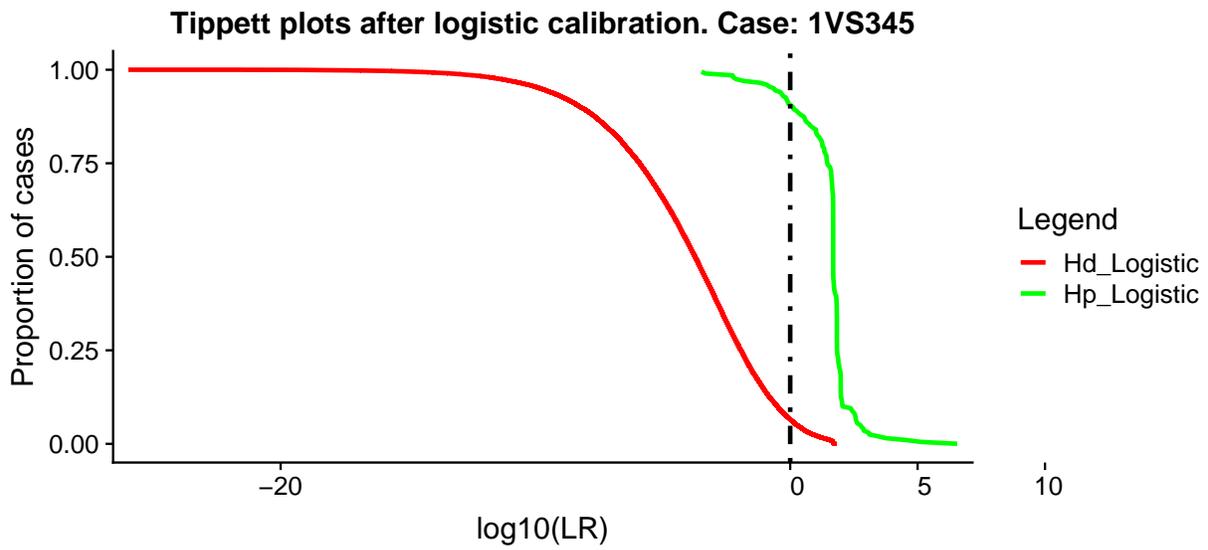
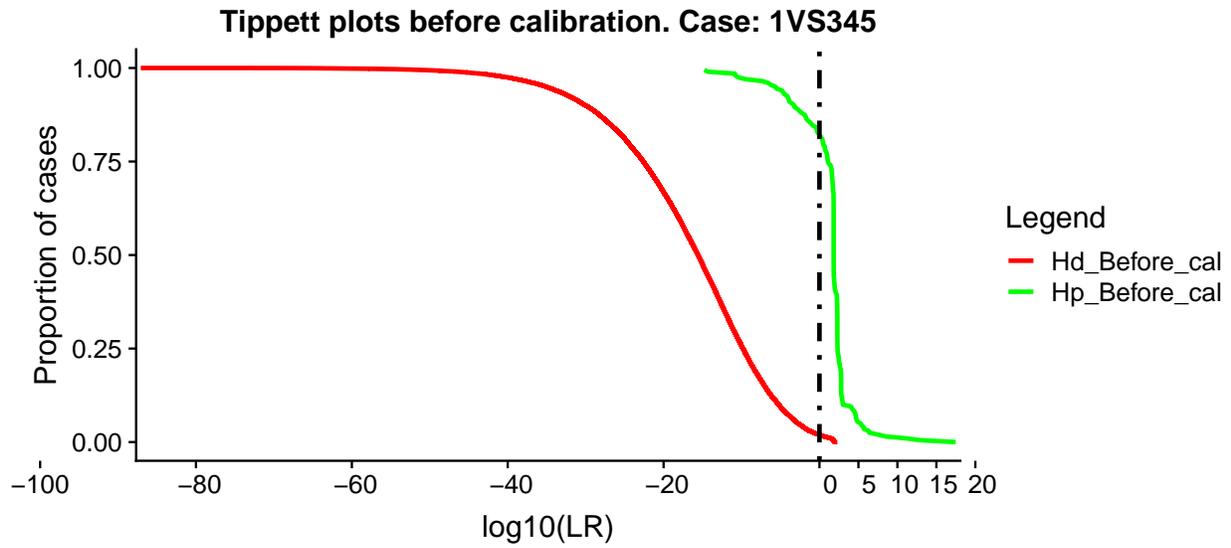


Figure 113: Courbes *Tippett* pour le cas 1VS345

### DET Curves.

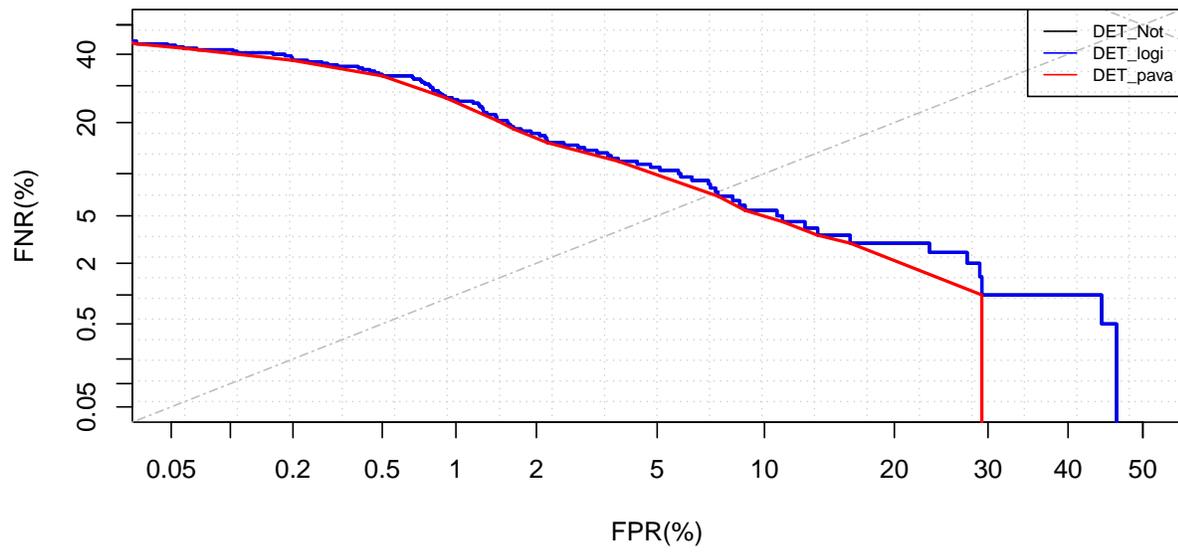


Figure 114: Courbes *DET* pour le cas *1VS345*

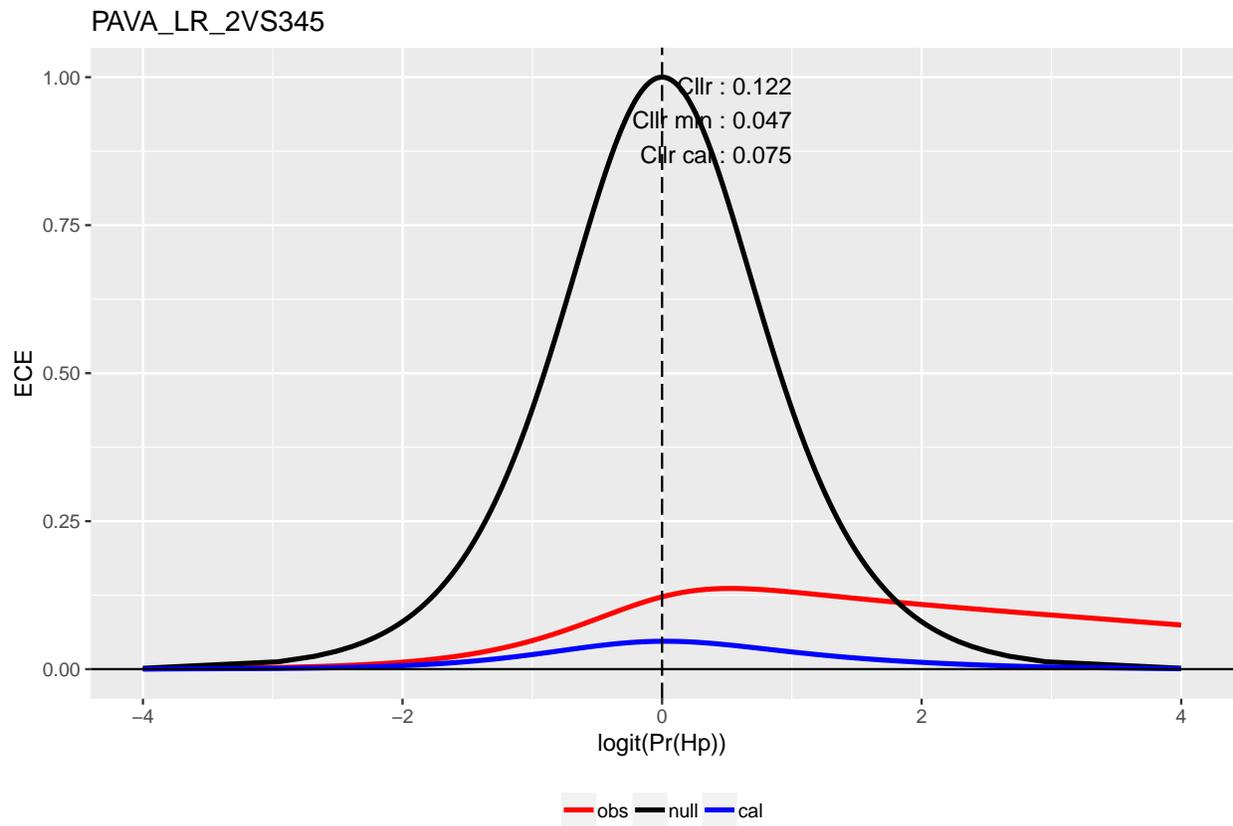
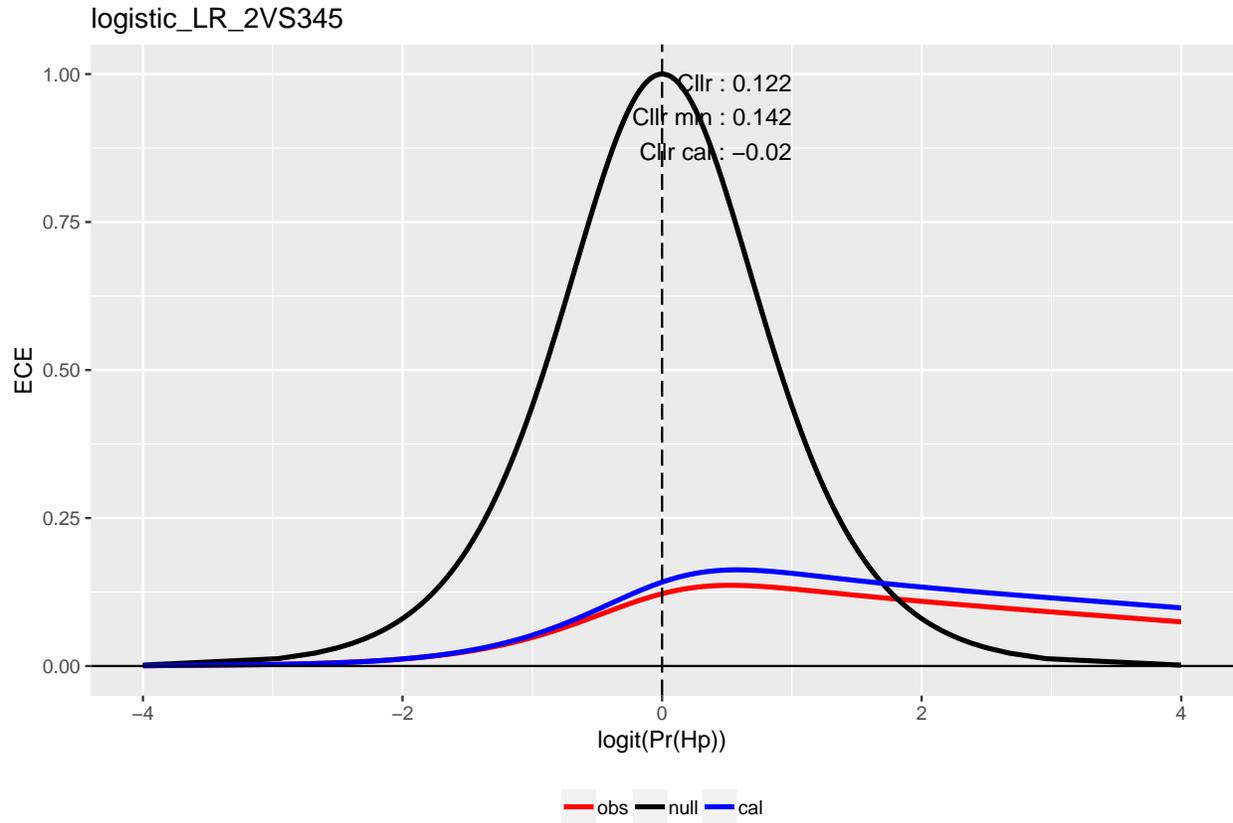


Figure 115: En haut: Courbe de calibration *ECE* obtenue par régression logistique. En bas: Courbe de calibration *ECE* obtenue par la méthode *PAVA*. 161

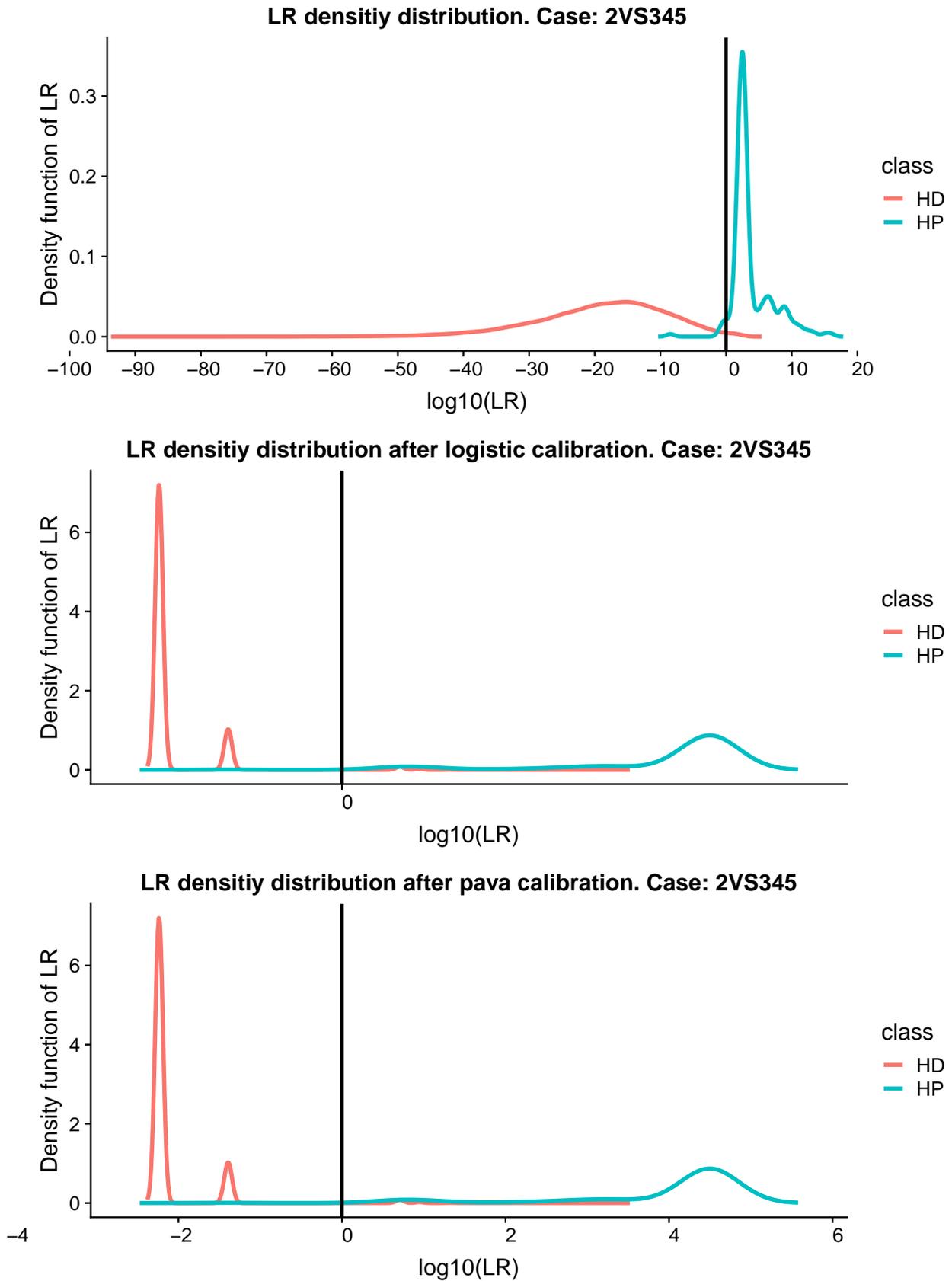


Figure 116: Distribution des densités du  $LR$ , avant et après la calibration, pour le cas  $2VS345$

### LR density distribution . Case: 2VS345

class ■ HP ■ MAX\_HD

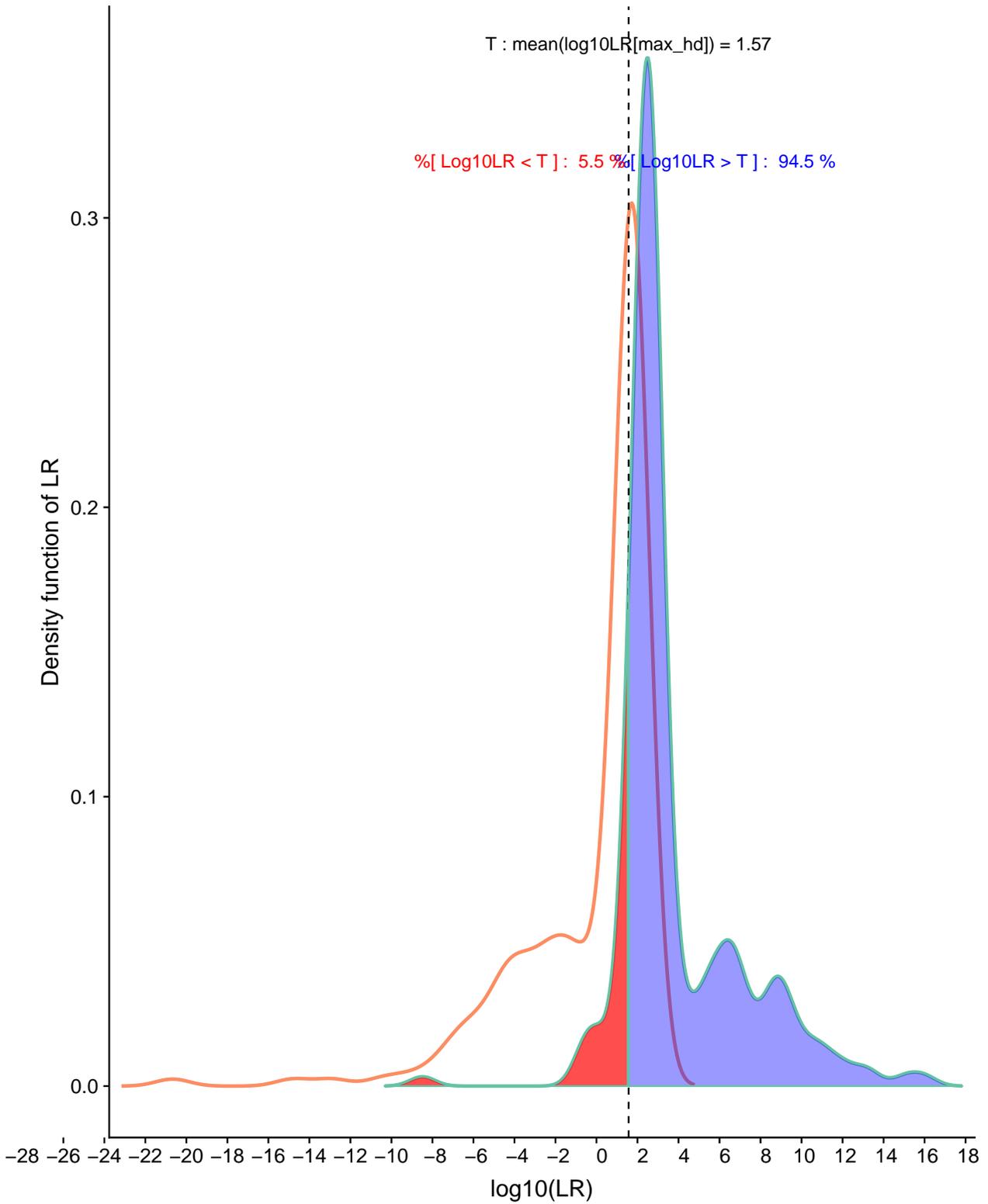


Figure 117: Distribution des densités du  $LR$ , sous  $Hp$  et son maximum sous  $Hd$ , pour le cas  $2VS345$

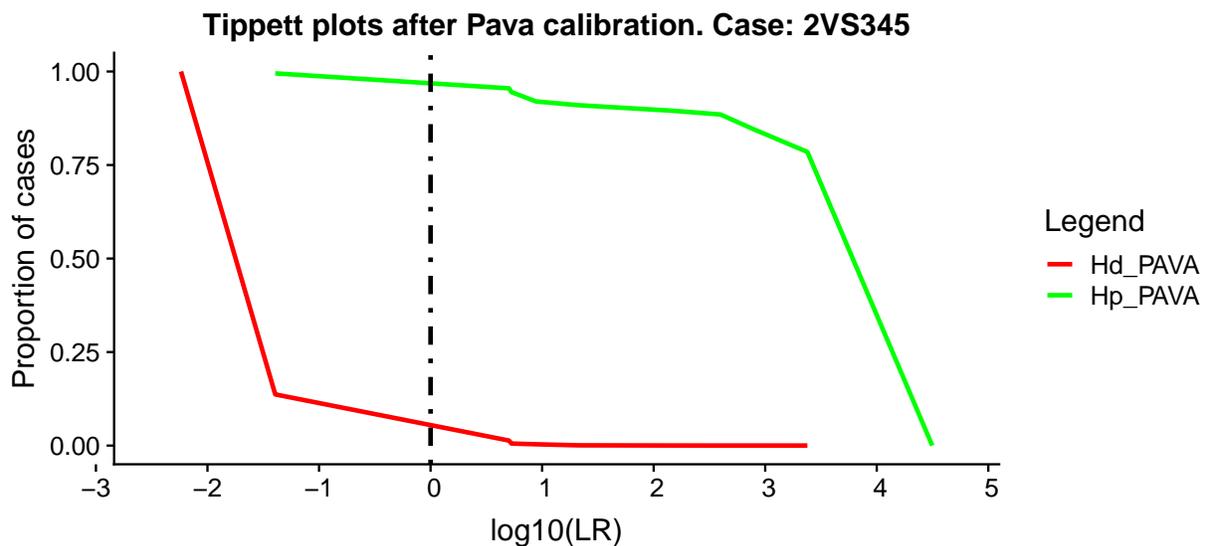
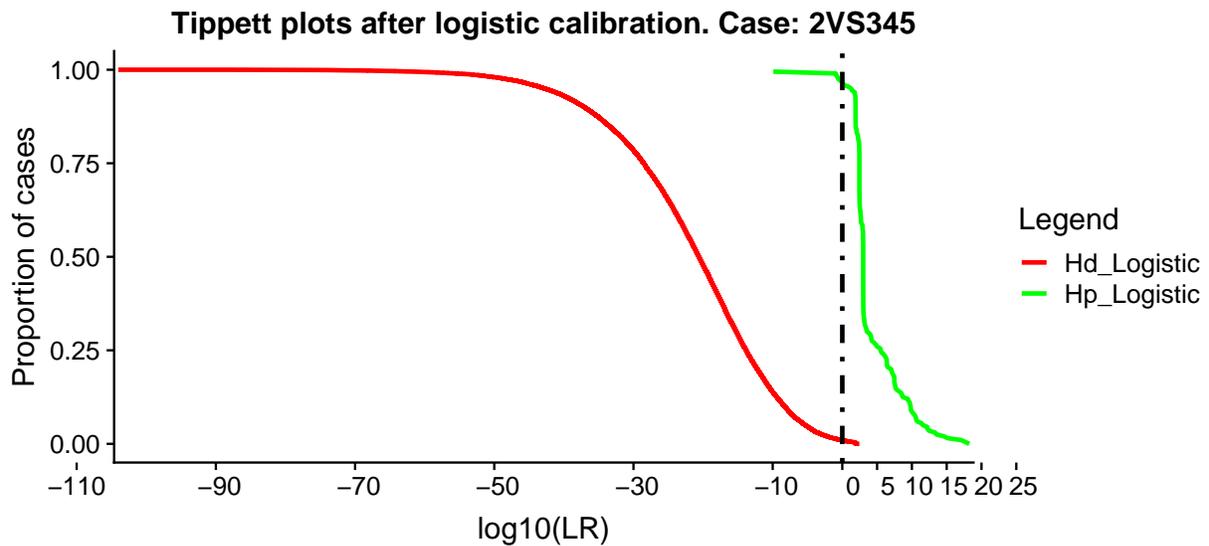
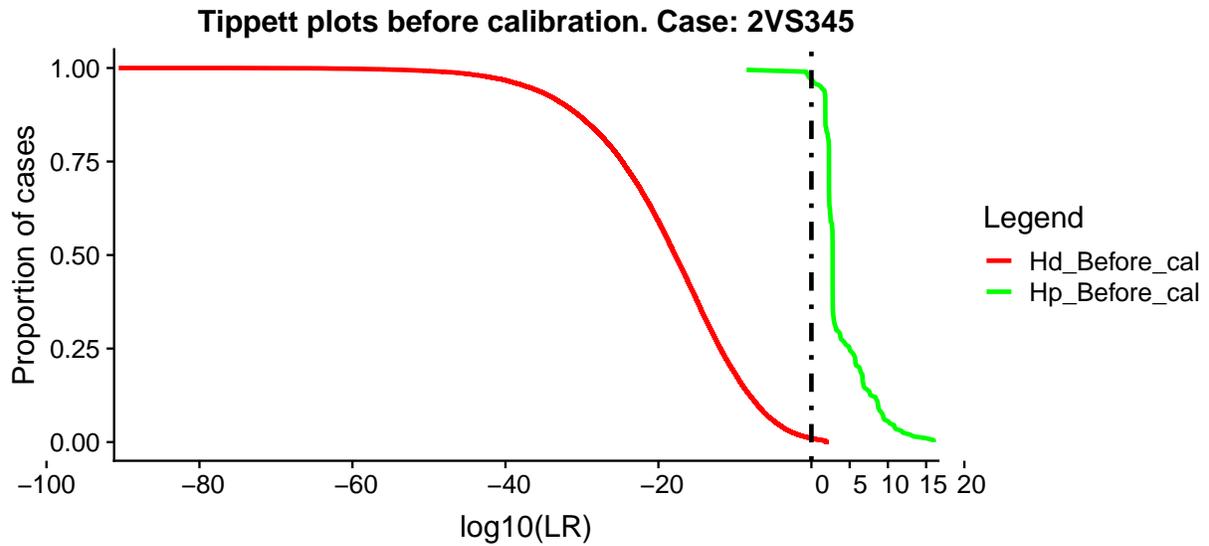


Figure 118: Courbes *Tippett* pour le cas 2VS345  
164

### DET Curves.

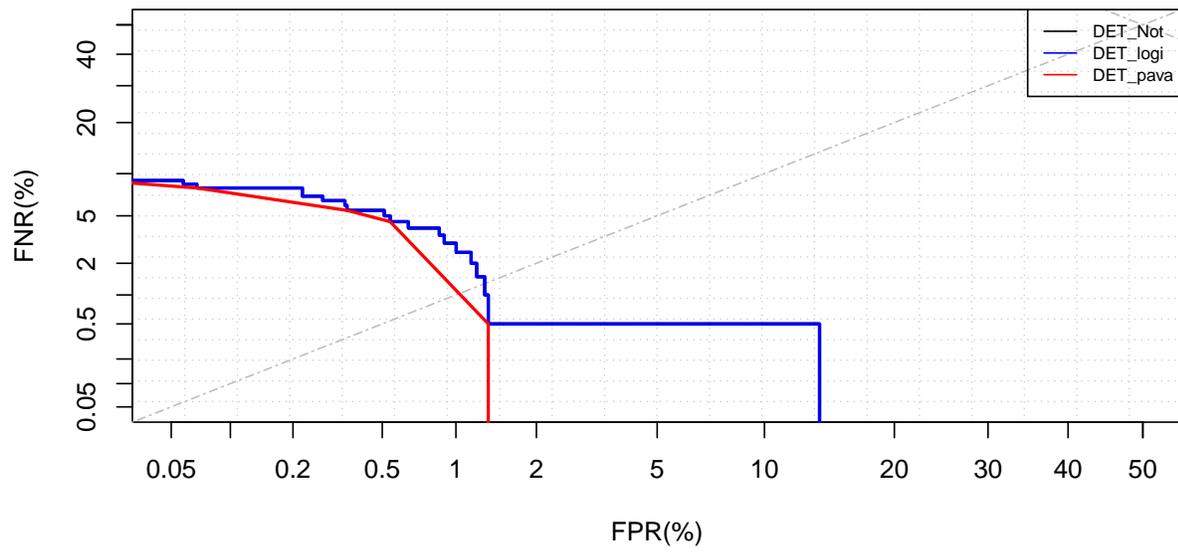


Figure 119: Courbes *DET* pour le cas *2VS345*

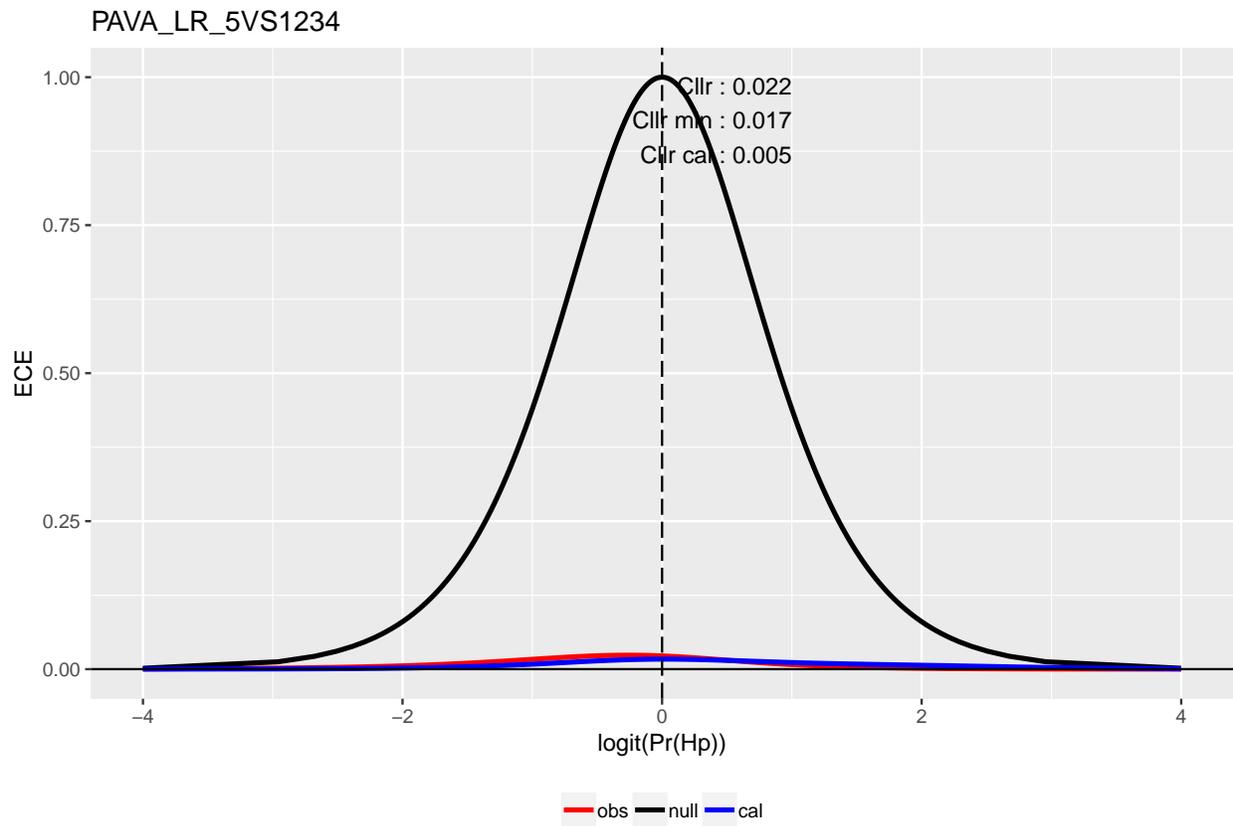
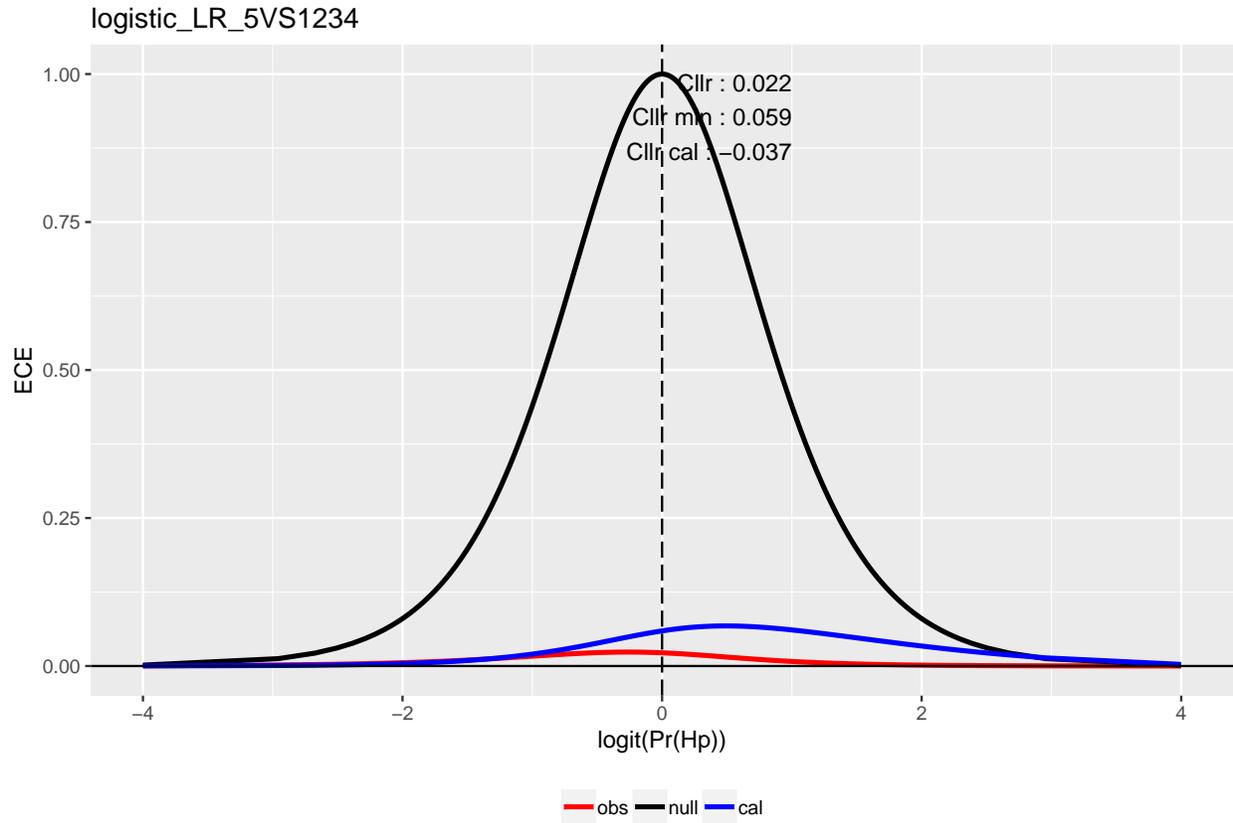


Figure 120: En haut: Courbe de calibration *ECE* obtenue par régression logistique. En bas: Courbe de calibration *ECE* obtenue par la méthode *PAVA*. 166

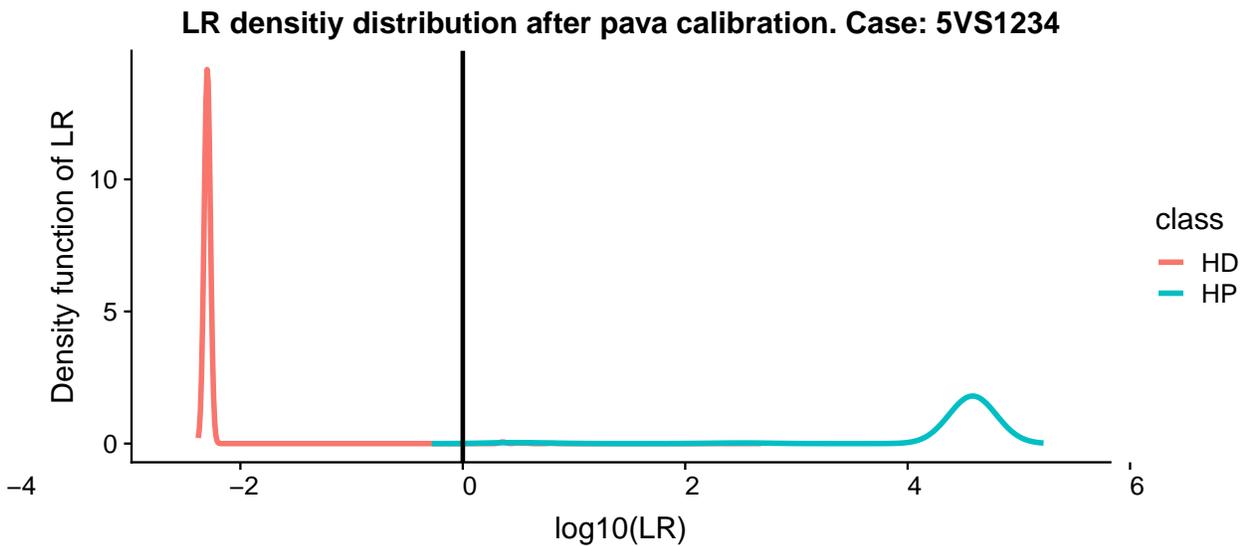
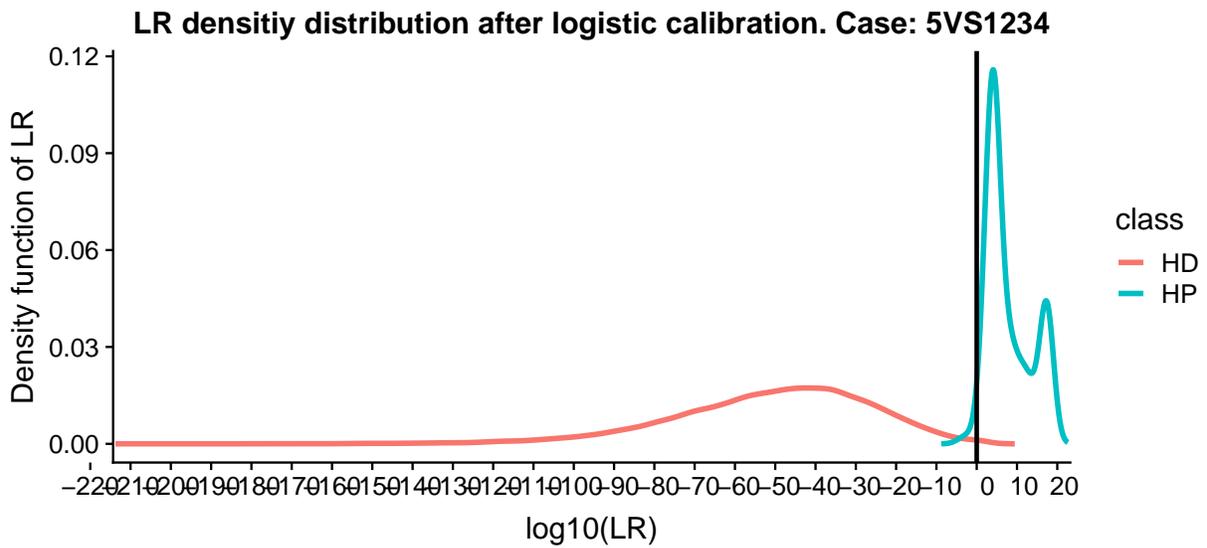
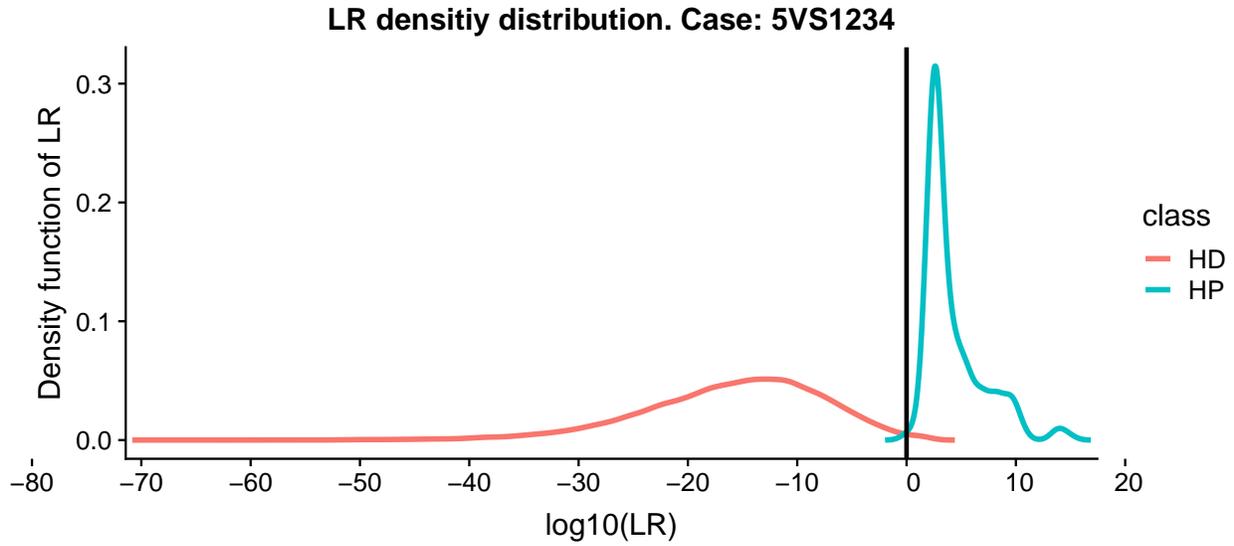


Figure 121: Distribution des densités du  $LR$ , avant et après la calibration, pour le cas  $5VS1234$

### LR density distribution . Case: 5VS1234

class ■ HP ■ MAX\_HD

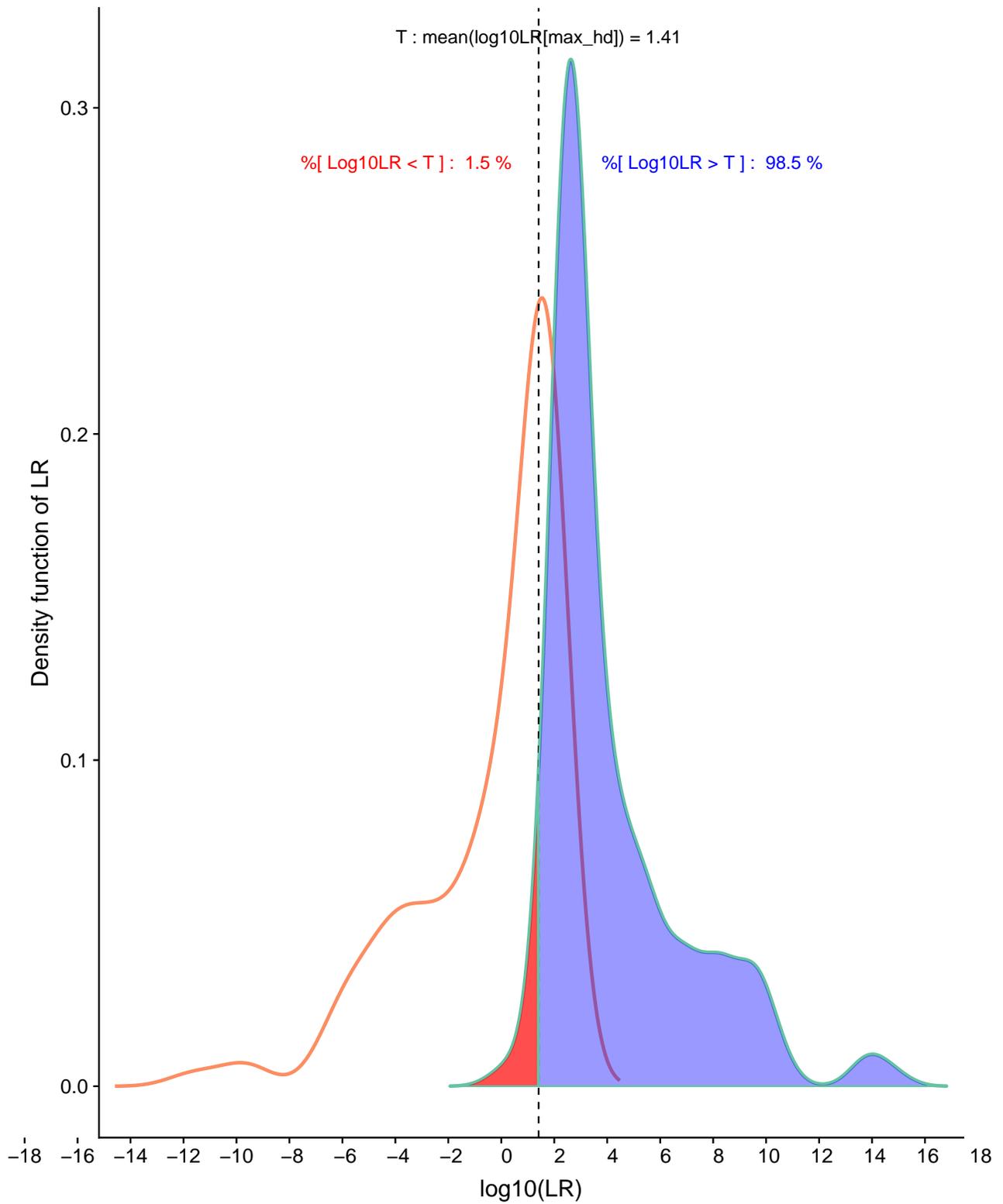


Figure 122: Distribution des densités du  $LR$ , sous  $H_p$  et son maximum sous  $H_d$ , pour le cas 5VS1234

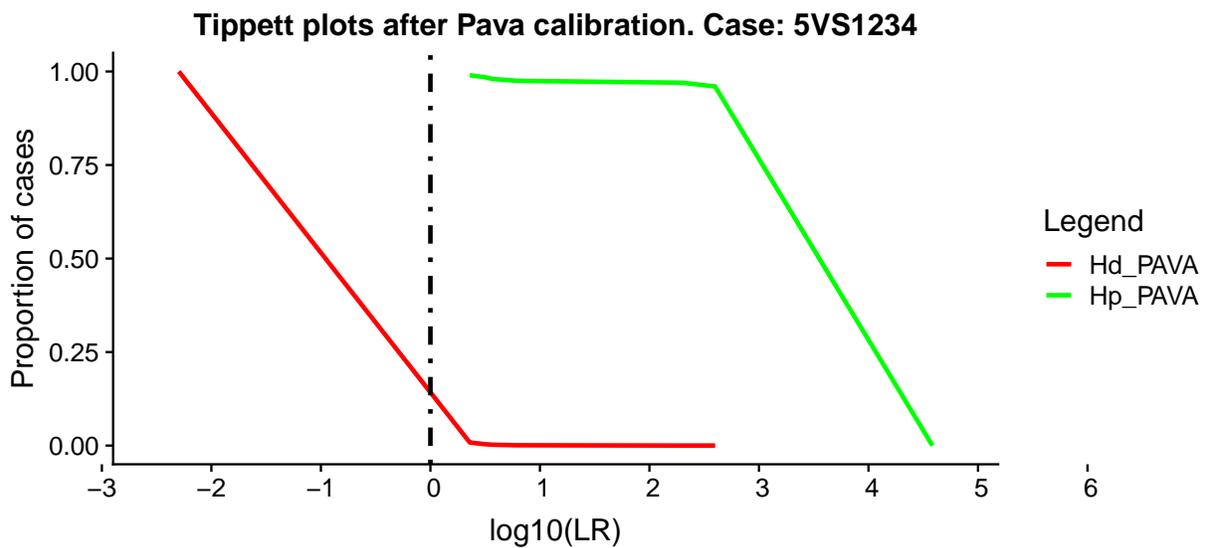
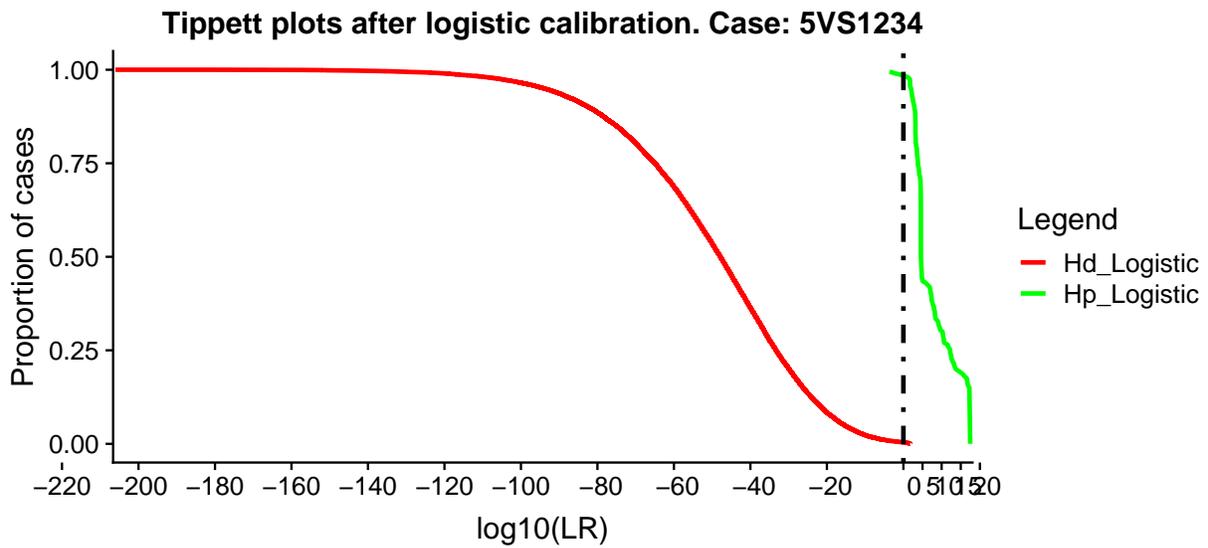
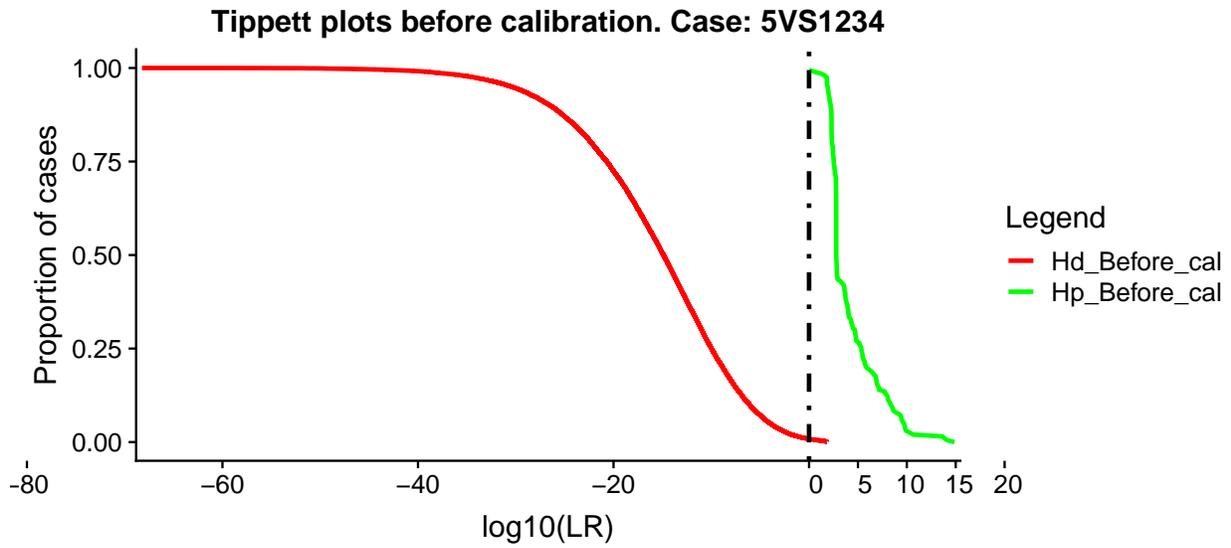
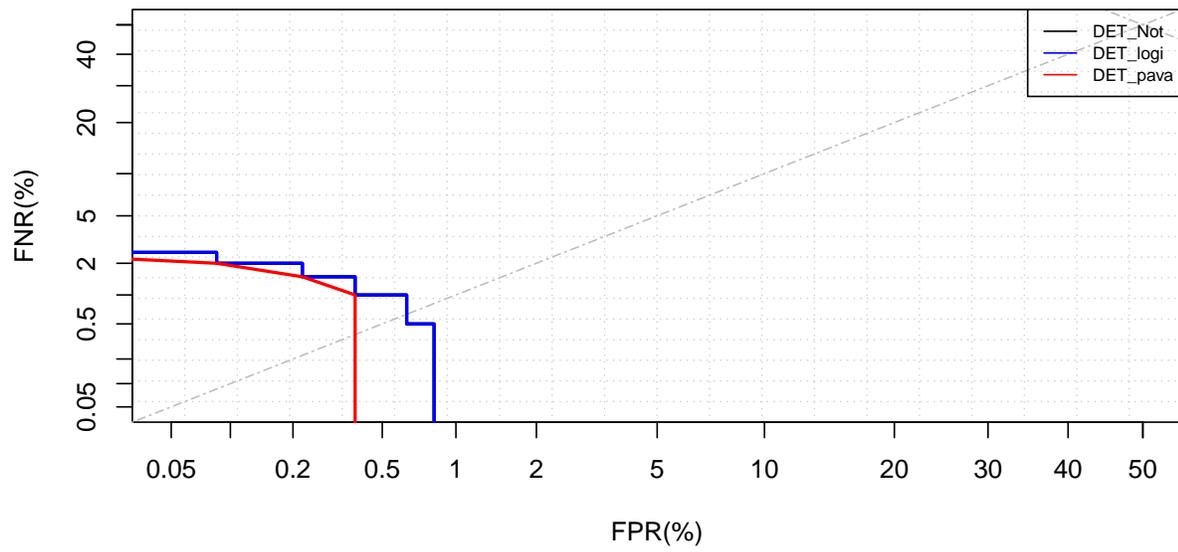


Figure 123: Courbes *Tippett* pour le cas 5VS1234

### DET Curves.



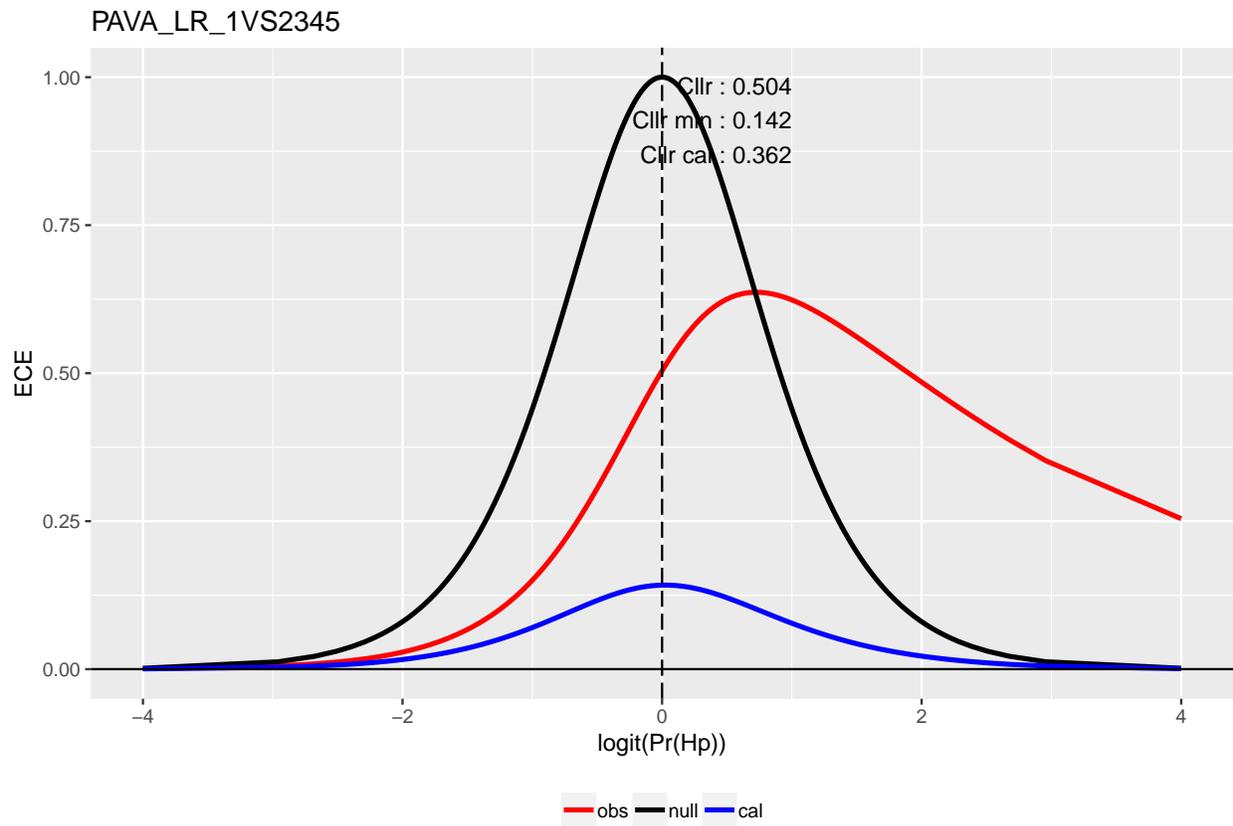
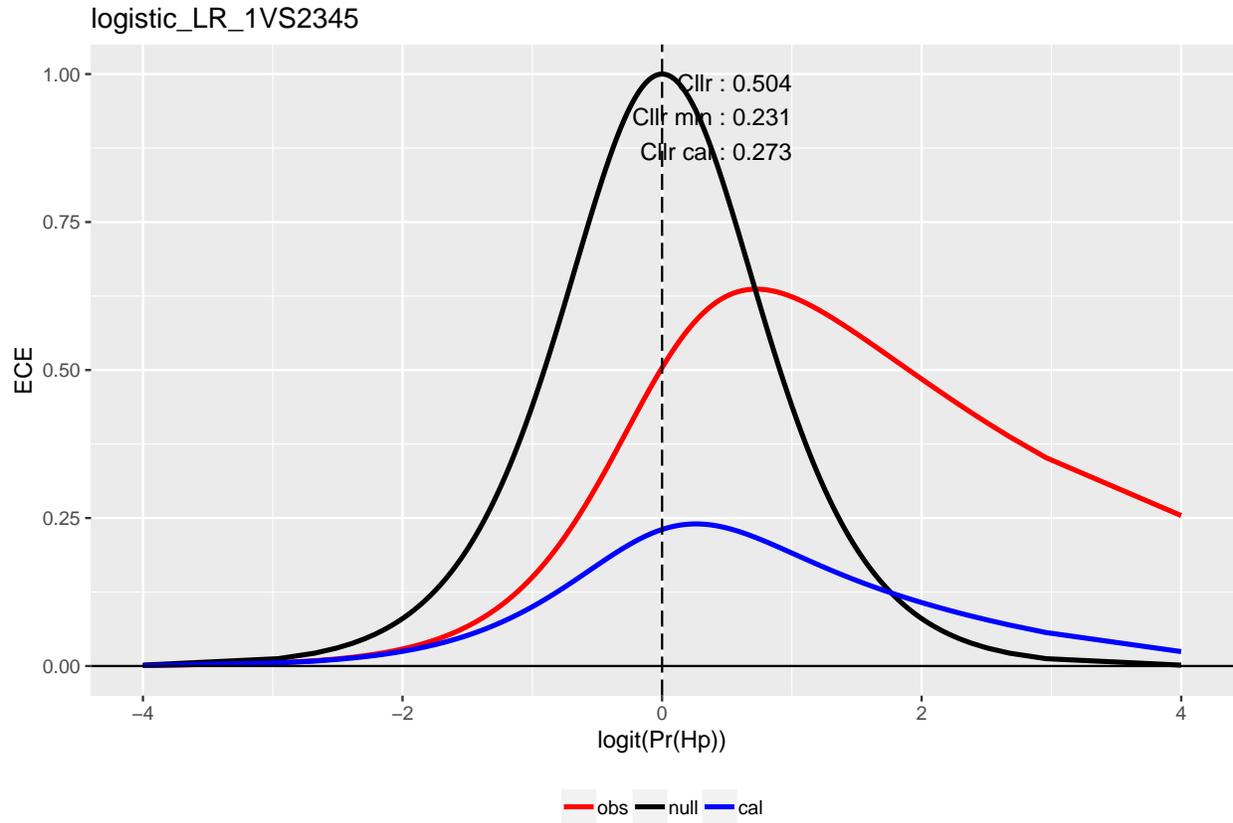


Figure 125: En haut: Courbe de calibration *ECE* obtenue par régression logistique. En bas: Courbe de calibration *ECE* obtenue par la méthode *PAVA*. 171

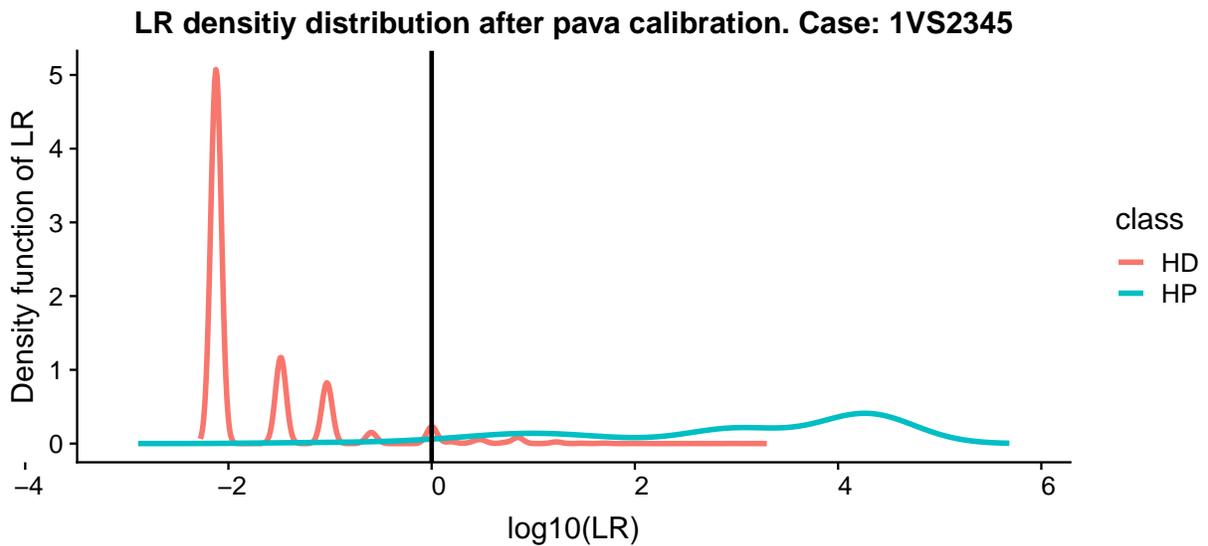
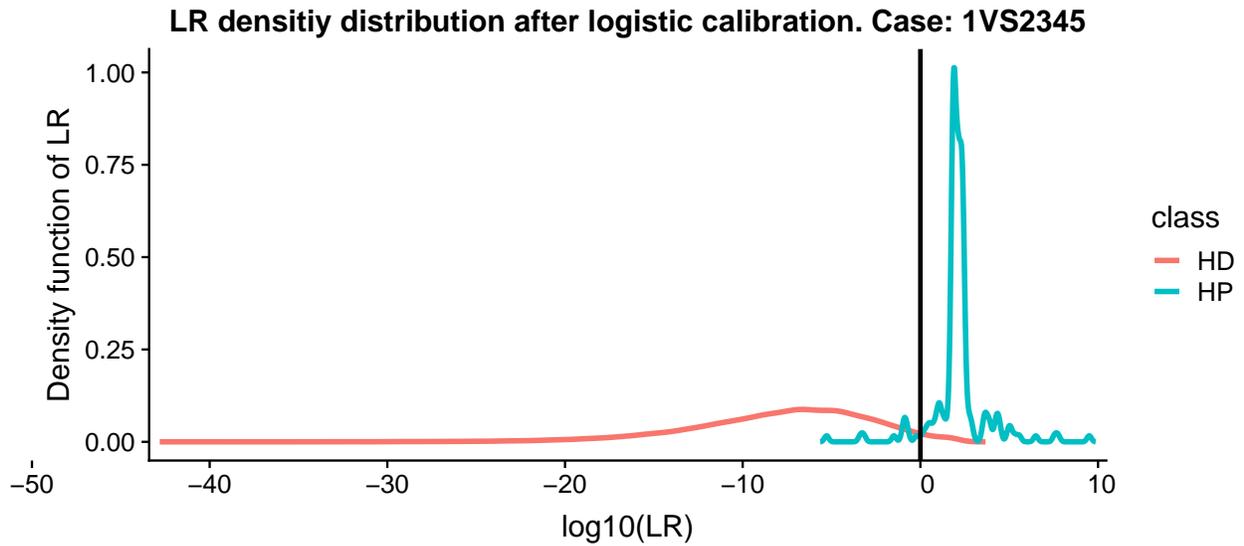
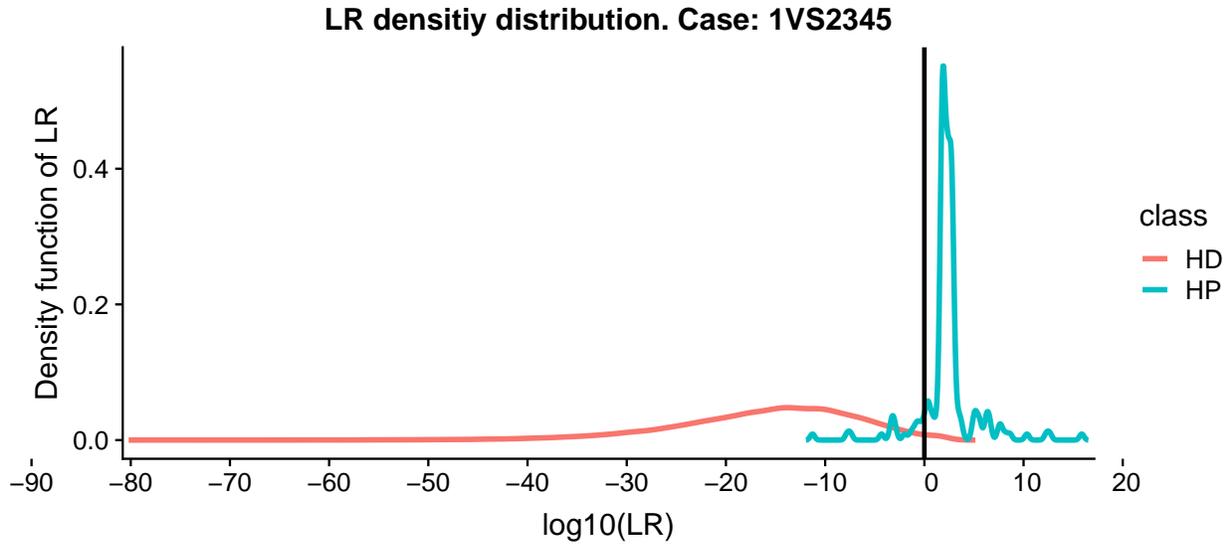


Figure 126: Distribution des densités du  $LR$ , avant et après la calibration, pour le cas  $1VS2345$

### LR density distribution . Case: 1VS2345

class ■ HP ■ MAX\_HD

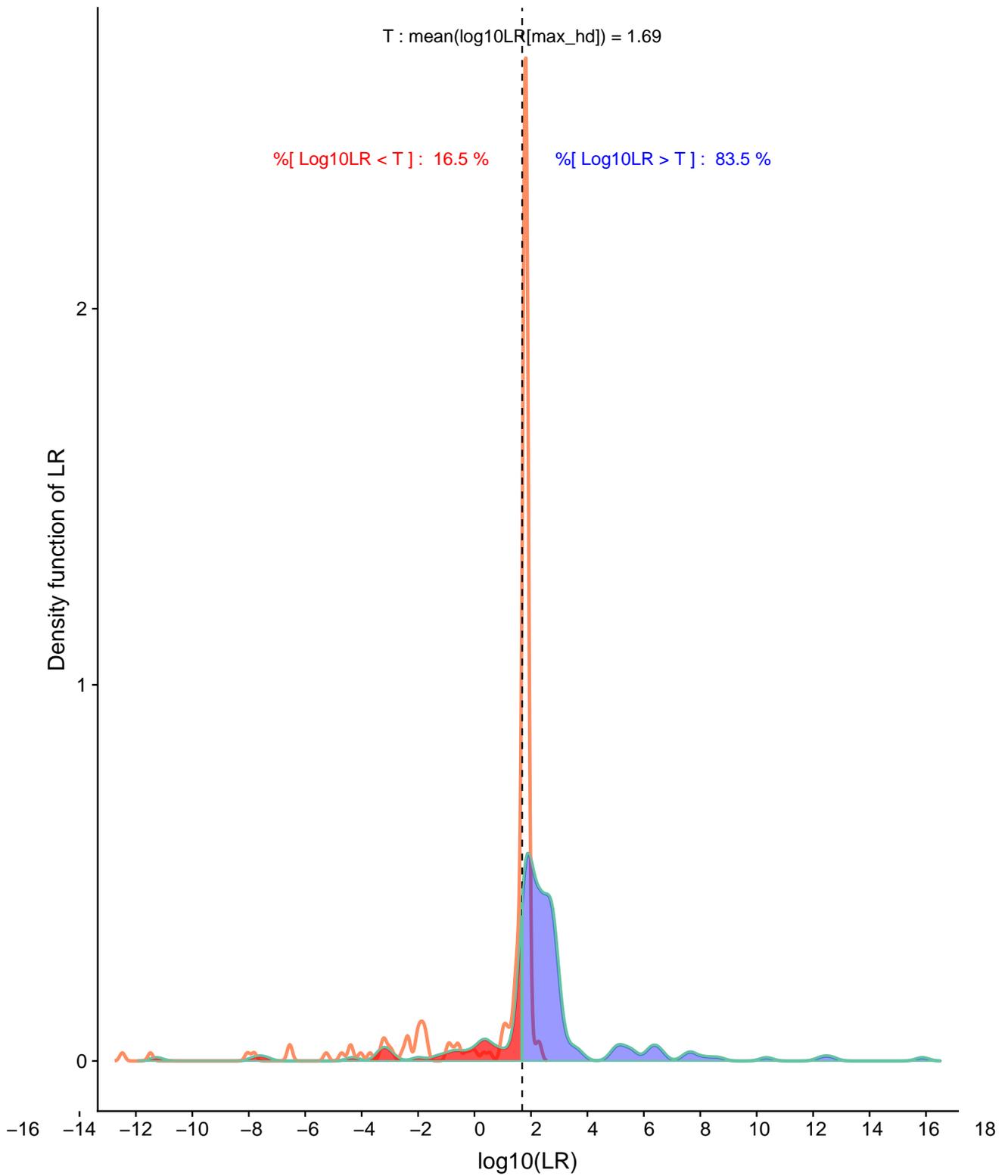


Figure 127: Distribution des densités du  $LR$ , sous  $H_p$  et son maximum sous  $H_d$ , pour le cas  $1VS2345$

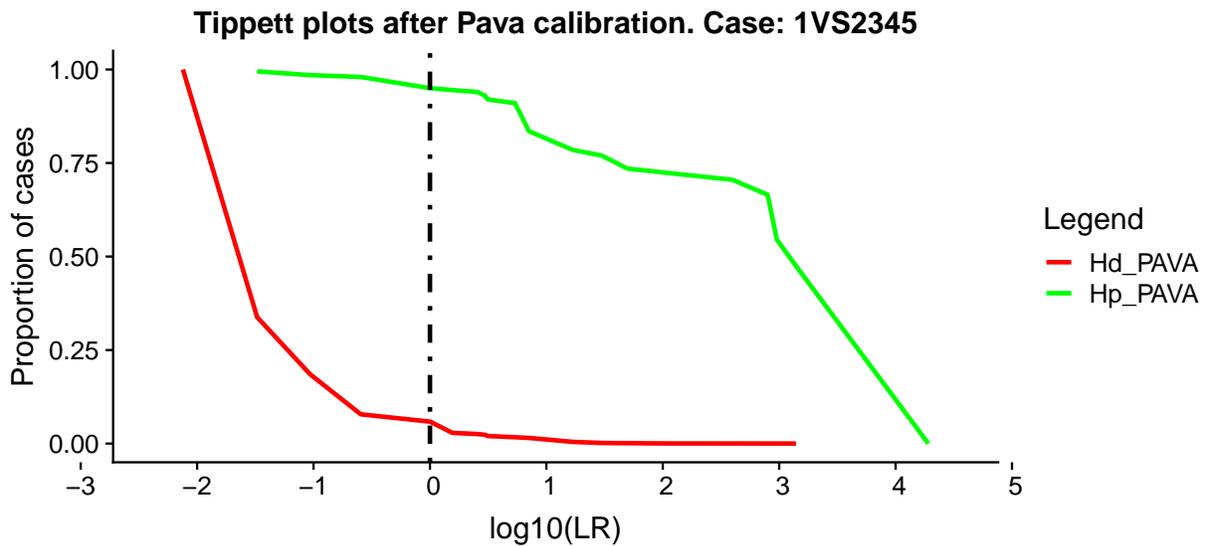
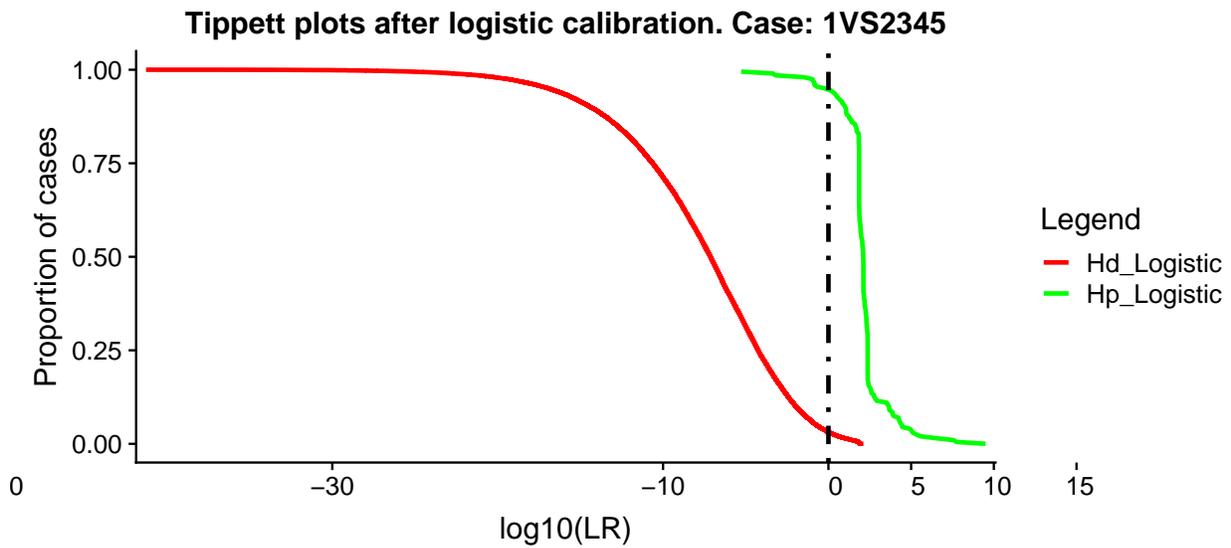
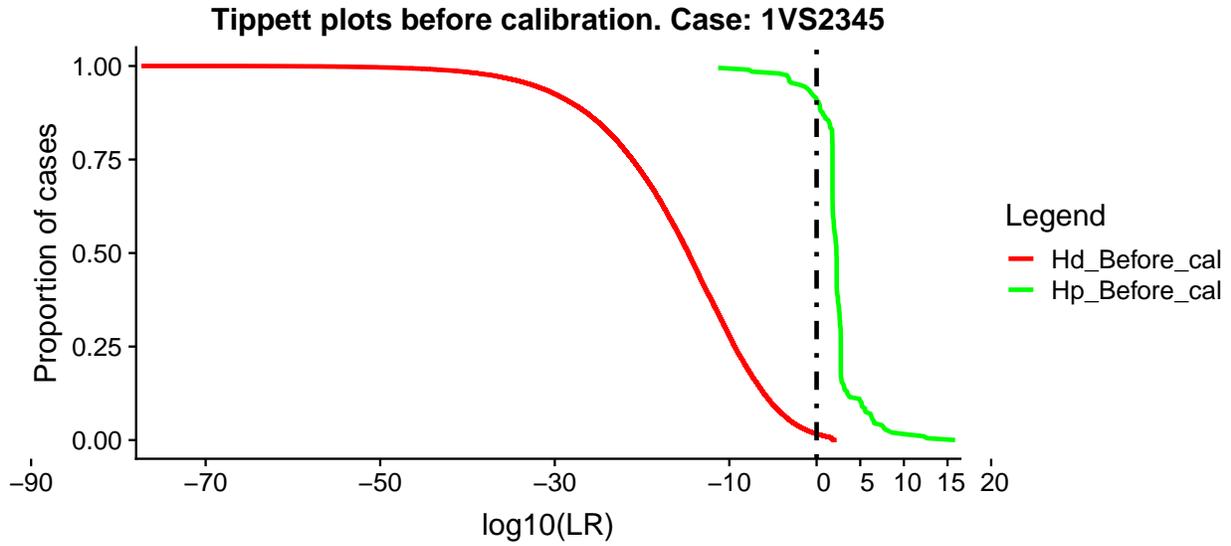


Figure 128: Courbes *Tippett* pour le cas 1VS2345

### DET Curves.

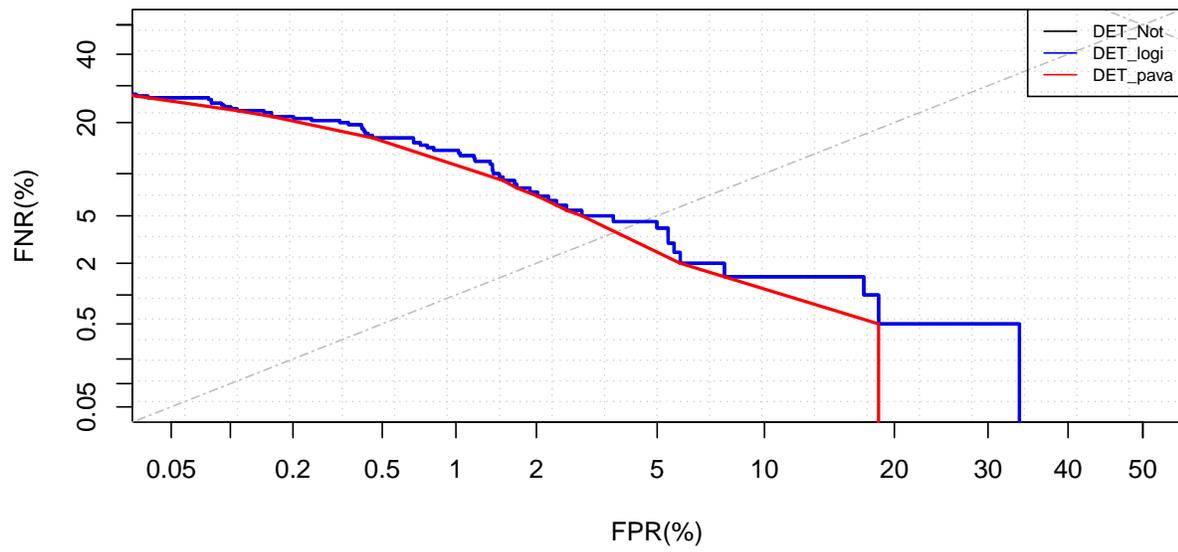


Figure 129: Courbes *DET* pour le cas *1VS2345*