

IMPACT ÉCONOMIQUE DE LA PLEUROPNEUMONIE CONTAGIEUSE CAPRINE ET ANALYSE COÛT-BÉNÉFICE DE LA VACCINATION SEMESTRIELLE*

Renault Véronique¹, Hambe Haret A.², Van Vlaenderen Guy³, Timmermans Eddy⁴,
Mohamed Ahmed M.⁵, Ethgen Olivier⁶, Saegerman Claude¹



RÉSUMÉ

Au Kenya, et en Afrique de l'Est d'une manière générale, la pleuropneumonie contagieuse caprine (PPCC) est l'une des principales maladies transfrontalières infectieuses des petits ruminants. Elle affecte fortement les moyens de subsistance des éleveurs en zone pastorale. Des campagnes de vaccination semestrielles sont organisées en vue de contrôler la maladie qui reste enzootique avec une haute prévalence. L'impact de la maladie et le rapport coût-bénéfice des mesures de contrôle sont difficiles à évaluer en zone pastorale du fait d'un manque de données fiables. L'enclavement des zones, la mobilité et la dynamique des troupeaux ainsi que le haut niveau d'analphabétisme des populations rendent la collecte d'informations extrêmement difficile. De telles analyses sont néanmoins primordiales en vue d'évaluer l'efficacité des programmes de contrôle et de justifier l'organisation des campagnes de vaccination dans le cadre d'un programme d'éradication de la PPCC ou d'un programme de soutien aux moyens de subsistance visant à préserver l'un des biens de production les plus importants de la région. Un suivi longitudinal de troupeaux a été mis en place durant un an dans le district de Turkana en vue de collecter des données sur la dynamique des troupeaux et d'enregistrer les différentes causes de mortalité. Sur la base de ces données, un modèle stochastique a été développé en vue d'évaluer les pertes économiques annuelles liées à la PPCC dans un troupeau standard de 100 chèvres et de comparer ces pertes au coût de la vaccination. Le ratio coût-bénéfice de la vaccination semestrielle a ensuite été déterminé. Différents scénarios ont été pris en compte avec 95 %, 50 % et 20 % d'efficacité vaccinale. Le modèle montre que le ratio coût-bénéfice de la vaccination reste intéressant même avec une efficacité vaccinale limitée à 20 % (ratio moyen de 5,715 avec un écart-type de 3,914). Une meilleure efficacité est néanmoins requise si l'on veut atteindre des résultats durables, que ce soit sur le plan du contrôle de la maladie ou sur le plan de l'amélioration des moyens de subsistance.

Mots-clés : caprins, suivi longitudinal, PPCC, analyse économique, vaccination, Kenya, zone pastorale.

.../..

Reçu le 7 octobre 2019, accepté le 13 novembre 2019

*Texte de la communication orale présentée au cours de la Journée scientifique AEEMA, 24 mai 2019

¹ Unité de recherche en épidémiologie et analyse de risques appliquées aux sciences vétérinaires (UREAR-ULiège), Fundamental and Applied Research for Animal Health (FARAH) Centre, Faculté de Médecine Vétérinaire, Université de Liège, Belgique

² County coordinator, Accelerated Value Chain Program - Livestock Component (AVCD -LC); International Livestock Research Institute; Kenya

³ Consultant indépendant

⁴ Coordinateur technique, Vétérinaires Sans Frontières - Belgique (VSF-B)

⁵ Consultant indépendant

⁶ Research Unit in Public health, Epidemiology and Health Economics, Department of Public health sciences, Faculty of Medicine, University of Liège, Belgique

.../..

ABSTRACT

In Kenya, and West Africa in general, contagious caprine pleuropneumonia (CCPP) is one of the main transboundary diseases of small ruminants. It strongly affects the livelihoods of the livestock keepers in pastoral areas. Biannual vaccination campaigns are organised in order to prevent the disease, but its prevalence remains important. CCPP remains endemic in the area. Measuring the disease impact and the cost-benefit ratio of the control measures such as the vaccination program is a challenging task in pastoral areas, due to a lack of reliable data. Proper data collection is extremely difficult due to the isolation of the areas, the mobility and herds dynamic, as well as the populations' illiteracy. Nevertheless, such analyses are necessary in order to assess the control program effectiveness and to justify the vaccination campaigns' implementation as part of a CCPP eradication program or a livelihoods support program, in order to preserve one of the most important livelihoods of the region. A longitudinal survey was implemented over one year in Turkana County, in order to collect data on the flocks dynamic and record the different causes of mortality. Based on these data, a stochastic model was developed in order to assess the annual economic losses due to CCPP in a standard flock of 100 goats. These losses were compared to the vaccination costs in order to determine the cost-benefit ratio of the vaccination programs. Different effectiveness scenarios were considered in terms of vaccination effectiveness (95%, 50% and 20% effectiveness). The model demonstrates that the cost-benefit ratio remains in favour of the vaccination even with an effectiveness limited to 20% (average ratio of 5.715 with a standard deviation of 3.914). Nevertheless, in order to achieve sustainable results in terms of disease control or livelihoods, a higher effectiveness is required.

Keywords: Goat, Longitudinal survey, CCPP, Economic analysis, Vaccination, Kenya, Pastoral area.



INTRODUCTION

Au cours des dernières décennies, le pastoralisme a été confronté à de nombreuses contraintes, notamment dans les zones arides et semi-arides (ASALs) d'Afrique. Les éleveurs transhumants sont à présent extrêmement vulnérables et leur activité d'élevage est confrontée à de nombreux risques dont les sécheresses, les maladies infectieuses et, dans certaines zones, l'insécurité [County et Lepeni Lekapana, 2013 ; Ebei *et al.*, 2008 ; Fitzgibbon, 2012 ; King *et al.*, 2012 ; Kipronoh *et al.*, 2016 ; Opiyo *et al.*, 2015]. En vue de limiter les risques liés aux maladies infectieuses, différentes mesures de biosécurité (MBS) peuvent aider à les prévenir et/ou contrôler leur propagation en vue de réduire leur incidence et leur impact sur les moyens de subsistance des populations d'éleveurs transhumants. Dans les zones de haute prévalence, la vaccination est préconisée comme principale mesure de prévention. Les autres MBS comme l'isolement des animaux malades, la limitation des mouvements d'animaux et la quarantaine en cas d'achat sont difficiles à appliquer aux systèmes d'élevage transhumants. L'Union Africaine recommande donc des campagnes de vaccination annuelles ou

semestrielles en vue de lutter contre les principales maladies infectieuses telles que la pleuropneumonie contagieuse caprine (PPCC) et la peste des petits ruminants (PPR) [AU-IBAR, 2016]. Ces campagnes représentent des coûts logistiques importants et de nombreuses contraintes. Il est donc important de pouvoir calculer et analyser le ratio coût-bénéfice de cette MBS en vue de déterminer son utilité et de la justifier dans le cadre de programmes de lutte et d'éradication ou de programmes d'appui aux moyens de subsistance des populations [Lipner et Brown, 1995].

L'élevage caprin joue un rôle essentiel en zone pastorale du fait de :

1. Leur vente en cas de besoins financiers ponctuels tels que les frais médicaux ou scolaires,
2. Leur valeur nutritionnelle en tant que source de protéines animales, notamment pour les enfants malades ou mal nourris et,
3. Leur utilisation sociale pour le paiement de la dot ou l'organisation d'activités communautaires.

La PPCC est une maladie infectieuse très contagieuse causée par *Mycoplasma capricolum sub. spp. capripneumoniae* (mccp) [Thiaucourt et Bolske, 1996]. Elle se transmet par contact direct entre les animaux, présente un taux de morbidité de 80 à 100 % et un taux de mortalité pouvant atteindre 70 % [Lefèvre et Thiaucourt, 2018]. Listée comme maladie à déclaration obligatoire par l'OIE, cette maladie représente une menace importante dans les régions enzootiques à haute prévalence et entraîne de lourdes conséquences sur l'économie locale et les moyens de subsistance des populations. Plusieurs études ont identifié la PPCC comme l'une des principales maladies infectieuses affectant les caprins dans les ASALs [Bett *et al.*, 2009 ; Kipronoh *et al.*, 2016 ; Peyraud *et al.*, 2014]. La maladie est bien connue des éleveurs transhumants qui la décrivent comme une maladie respiratoire entraînant un taux de mortalité élevé et identifiable par des lésions *post-mortem* pathognomoniques de pleuropneumonie fibrineuse [Asmare *et al.*, 2016]. Les éleveurs mentionnent « des côtes et poumons collés » lors de l'ouverture du cadavre.

Depuis le début des années 1980, le ministère de l'élevage du Kenya organise des campagnes semestrielles de vaccination gratuites. Le vaccin utilisé est le Caprivax TM, vaccin à virus inactivé produit localement par l'institut de production des vaccins vétérinaires au Kenya (KEVEVAPI).

L'efficacité du vaccin de bonne qualité testé en condition expérimentale a été estimé à 95 % [Rurangirwa *et al.*, 1991] et ce suite à l'injection d'une dose unique (0,15mg). Néanmoins, de nombreux facteurs peuvent interférer avec l'efficacité du vaccin au cours d'une campagne de vaccination. Citons notamment le maintien de la chaîne du froid (le vaccin doit être stocké entre 2 et 8°C) de l'usine aux utilisateurs finaux. Cette condition est difficilement respectée dans le contexte local du fait des ressources limitées des services vétérinaires, des distances à parcourir et de la chaleur [Lipner et Brown, 1995]. L'état sanitaire et nutritionnel des animaux et le respect du protocole de vaccination peuvent également affecter l'efficacité de la vaccination [Matios *et al.*, 2014]. Le taux de couverture vaccinale relativement bas affecte également l'efficacité globale des campagnes de vaccination, ce qui pourrait remettre en question la justification financière de ces dernières.

Les objectifs de cette étude étaient d'évaluer l'impact économique de la PPCC dans la zone d'étude et de calculer le ratio coût/bénéfice des campagnes de vaccination semestrielles. L'étude se fonde sur des données obtenues au cours d'un suivi longitudinal d'un an et prend en compte différents scénarios en fonction de l'effectivité vaccinale (proportion des animaux réellement immunisés après vaccination dans les conditions de terrain).

I - MATÉRIEL ET MÉTHODES

1. LE SUIVI LONGITUDINAL

Cette étude est fondée sur les résultats d'un suivi longitudinal réalisé dans le comté de Turkana. Ce comté est localisé dans la vallée du Rift, au Nord-Ouest du Kenya (figure 1). C'est le deuxième plus grand comté du Kenya. C'est également le plus pauvre avec 94 % de sa population vivant sous le seuil de pauvreté et un taux d'alphabétisation de 19 % contre une moyenne nationale de 79 % [Gouvernement of Kenya, 2006]. Il fait partie des ASALs et se caractérise par une faible pluviosité et des températures pouvant aller jusqu'à 40°C durant la saison sèche. Le comté est divisé en zones pastorale et agro-pastorale. Une enquête auprès des ménages a estimé que 35 % d'entre eux étaient classifiés comme « très pauvres », 30 % comme « pauvres », 20 % comme « revenus moyens » et 15 % comme « mieux lotis » [King *et al.*, 2012]. La majorité de la population est composée d'éleveurs transhumants. Les caprins sont l'espèce prédominante et jouent un rôle important sur le plan social et économique. Ils représentent le principal

moyen de subsistance des ménages [Kipronoh *et al.*, 2016]. La PPCC est enzootique dans la région avec une séroprévalence allant de 63,9 % dans le comté de Turkana à 29,2 % dans le comté de Pokot Est [Kipronoh *et al.*, 2016]. La maladie est considérée par les éleveurs comme la plus fréquente affectant leurs troupeaux caprins avec une incidence rapportée de 25 % et un taux de mortalité de 62,5 % (avec les 10^e et 90^e percentiles de 25 et 100 %) [Bett *et al.*, 2009].

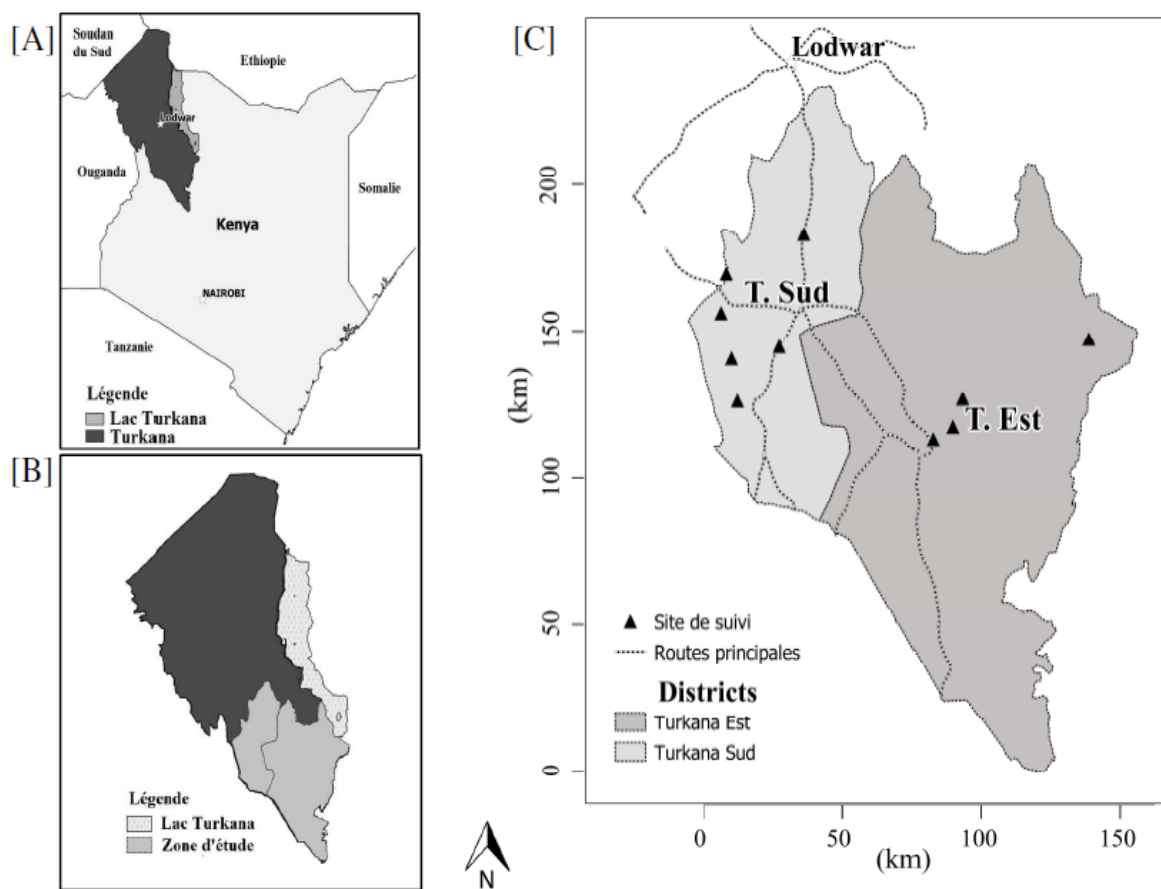
Le suivi des troupeaux a été réalisé de novembre 2012 à fin octobre 2013 dans deux districts : le Turkana Sud et le Turkana Est. Au cours de cette période, la pluviosité a été moyenne à supérieure à la moyenne avec de bonnes conditions de pâturages et de bons niveaux d'eau [FAO, 2013]. La méthode utilisée pour le suivi longitudinal et les résultats de ce dernier sont décrits en détail dans une publication précédente [Renault, 2014]. Au total, vingt troupeaux répartis dans six villages du Turkana Sud et cinq villages du Turkana Est ont été suivis mensuellement par des agents de terrain

préalablement formés à la méthode et aux outils de collecte. Les villages devaient être accessibles durant toute l'année et répartis dans les différentes zones agro-écologiques du comté (figure 1). Aucun des troupeaux n'avait été vacciné contre la PPCC l'année précédant l'étude et ils n'ont pas fait l'objet de vaccination au cours de l'étude. À chaque suivi, le nombre de têtes composant le troupeau était enregistré en fonction de leur catégorie d'âge et de sexe : femelles adultes (Af), mâles adultes (Am), jeunes femelles (Yf) et jeunes mâles (Ym). Les différentes entrées et sorties (volontaires et

involontaires) d'animaux ainsi que les causes de mortalité étaient également enregistrées. La mort d'un animal était considérée comme due à la PPCC lorsque l'éleveur citait les lésions *post-mortem* caractéristiques de pleuropneumonie fibrineuse. Les sorties involontaires comprennent les cas de mortalité ainsi que les animaux perdus ou volés. Les sorties volontaires reprennent les animaux consommés, vendus, ou donnés. Les différents taux mensuels calculés sur la base des données collectées sont repris en Annexe 1⁷.

Figure 1

Localisation de la zone d'étude et des sites de suivi



⁷ Annexe 1 : Taux d'entrées et de sorties enregistrés au cours du suivi longitudinal, consultable sur le site de l'AEEMA

2. DONNÉES D'ENTRÉE UTILISÉES POUR LE MODÈLE

2.1 TAUX DEMOGRAPHIQUES MENSUELS ISSUS DU SUIVI LONGITUDINAL

Les taux démographiques mensuels sont issus des données de suivi et ont été calculés pour chaque catégorie d'âge et de sexe. Le mode de calcul des

différents taux est celui proposé par Lesnoff *et al.* [2007]. Ils sont repris ci-dessous.

Après avoir calculé les taux pour les quatre catégories d'animaux, les taux obtenus en saison sèche et en saison des pluies ont été analysés et comparés dans Stata/SE 14.1 (© StataCorp LP, College Station, TX, USA) à l'aide d'un test de Welch afin de déterminer s'il y avait des différences saisonnières significatives à prendre en compte dans le modèle.

Équation 1 : Taux de natalité pour les mâles et femelles :

$$\frac{\text{Nr de naissance (x) au cours du mois}}{\text{Nr d'Af dans le troupeau en début de mois} + \frac{(\text{Nr de Af entrées} - \text{Nr de Af sorties})}{2}}$$

Avec: Nr, nombre ; (x), sexe mâle ou femelle ; Af, femelle adulte.

Équation 2 : Taux d'entrée pour les différentes catégories d'âge et de sexe :

$$\frac{\text{Nr d'animaux de la catégorie (x) entrés dans le troupeau}}{\text{Taille totale du troupeau en début de mois}}$$

Avec: Nr, nombre ; (x), la catégorie d'âge et de sexe.

Équation 3 : Taux de sortie pour la sortie de type « y » et l'animal de catégorie « x » :

$$\frac{\text{Nr de sorties de type "y" pour la catégorie "x" durant le mois}}{\text{Nr (x) au début du mois} + \frac{(\text{Nr (x) entrés} - \text{Nr (x) sortis})}{2}}$$

Avec : Nr (x), nombre d'animaux de la catégorie (x) et y, le type de sortie (ex. : vente, autoconsommation, vol et mortalité).

Remarque : Les taux de mortalité dus à la PPCC n'ont été calculés que pour les troupeaux ayant souffert d'au moins une mortalité due à la PPCC au cours du mois en question.

Équation 4 : Taux mensuel de jeunes femelles passant à la catégorie adulte après leur première mise-bas (CC_Yf)

$$CC_Yf = \frac{\text{Nr de Yf ayant mis bas au cours du mois}}{\text{Nr de Yf dans le troupeau en début de mois}}$$

Avec : Nr, nombre ; Yf, jeunes femelles.

2.2 DONNÉES D'ENTRÉE PROVENANT D'AUTRES SOURCES QUE LE SUIVI LONGITUDINAL

Le coût unitaire de la vaccination (0,12 euro/tête) a été obtenu auprès des services vétérinaires du comté de Turkana. Il représente le coût d'une vaccination effectuée dans le cadre d'une campagne de vaccination et ne reflète donc pas le coût d'une vaccination qui le serait dans le cadre d'une requête individuelle par un vétérinaire (privé ou public). Ce

coût inclut le prix du vaccin, les coûts logistiques et les rémunérations des agents étatiques dans le cadre de la campagne de vaccination.

Les données sur les valeurs monétaires des différentes catégories d'animaux ont été fournies par l'Institut international de recherche en élevage (ILRI) et le Ministère de l'élevage à travers leur système de surveillance mensuelle des marchés à bétail (données non publiées).

Les différents coûts (prix des animaux et coût de la vaccination) ont été fournis en shillings Kenyans et convertis en euros en utilisant le taux officiel fourni par la banque centrale du Kenya en date du 18 Janvier 2018.

3. MODELE STOCHASTIQUE POUR L'ESTIMATION DU RAPPORT COUT-BENEFICE DES CAMPAGNES DE VACCINATION SEMESTRIELLES CONTRE LA PPCC

Les distributions des différents taux utilisés dans le modèle ont été obtenues sur la base des données du suivi longitudinal à l'aide du logiciel @Risk® Version 7.6 (Annexe 2)⁸. Elles ont été utilisées comme données entrantes du modèle stochastique en vue de projeter l'évolution du troupeau sur un an et ce en quatre étapes de calcul (figure 2).

3.1 ÉTAPE 1 - MODELISATION DE L'ÉVOLUTION DU TROUPEAU FONDÉE SUR LES TAUX MENSUELS D'ENTRÉES ET DE SORTIES

La taille du troupeau initial au temps T_0 a été établie à 100 têtes et le nombre d'animaux par catégorie d'âge et de sexe a été fixé sur la base du taux moyen observé lors du démarrage du suivi.

L'évolution mensuelle a été simulée, pour les quatre catégories d'animaux, en appliquant les différents taux d'entrées et de sorties sur le nombre d'animaux présents au début du mois. Les différents taux d'entrées sont les naissances, les cadeaux et les achats. Les différentes sorties sont les mortalités (liées à la PPCC, à d'autres maladies et aux pluies), les sorties volontaires (autoconsommation, dons et ventes) et les sorties involontaires (animaux perdus, volés ou tués par des prédateurs). Ces différents taux ont été maintenus séparément afin de pouvoir, si besoin, appliquer des taux saisonniers à chacun d'entre eux dans le modèle.

L'évolution du troupeau, avec et sans vaccination contre la PPCC, a été simulée sur une période de 12 mois en utilisant différents taux de mortalité liés à la PPCC. L'évolution en absence de vaccination a été simulée en appliquant les taux de mortalité liés à la

PPCC obtenus au cours du suivi. La composition finale du troupeau obtenue suite à ce modèle a ensuite été utilisée comme référence en vue d'estimer l'impact économique de la PPCC (comparaison avec la composition du troupeau en l'absence de mortalité liée à la PPCC) et les bénéfices de la vaccination (comparaison avec la composition du troupeau en fin de suivi en cas de vaccination)

Plusieurs scénarios ont été considérés pour simuler l'évolution des troupeaux avec la mise en œuvre d'un programme semestriel de vaccination et ce en fonction de l'effectivité du vaccin (taux d'animaux réellement protégés contre la PPCC suite à la vaccination). Cette effectivité dépend en effet de plusieurs facteurs dont la qualité et les conditions d'utilisation du vaccin. Sur la base de l'opinion d'un expert (Laboratoire de référence OIE, CIRAD, Montpellier, France), de l'ILRI et des observations sur le terrain, les trois scénarios suivants ont été retenus :

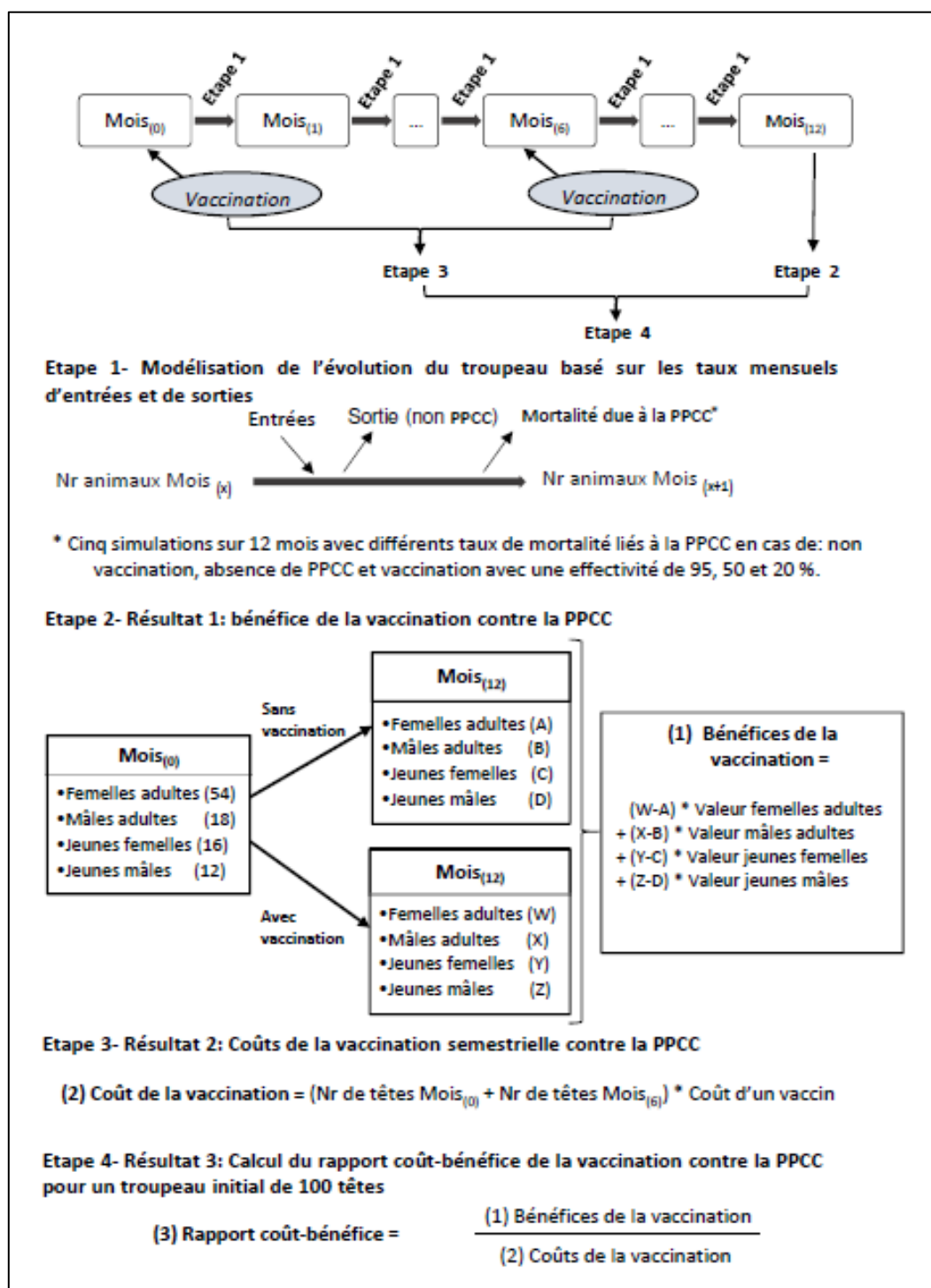
- **Scénario 1 (situation idéale) :** 95 % d'effectivité fondée sur l'utilisation d'un vaccin de bonne qualité [Rurangirwa *et al.*, 1991], le respect de la chaîne du froid et du protocole de vaccination et la prise en compte du statut sanitaire et nutritionnel des animaux au moment de cette dernière ;
- **Scénario 2 (scénario optimiste) :** 50 % d'effectivité de la vaccination en considérant un vaccin de bonne qualité avec quelques interruptions de la chaîne du froid durant le stockage et la campagne de vaccination ;
- **Scénario 3 (scénario le plus probable étant donné les conditions actuelles de mise en œuvre) :** 20 % d'effectivité du fait de l'utilisation d'un vaccin de moindre qualité, du non-respect de la chaîne du froid et de l'état d'affaiblissement des animaux lors de la vaccination, les campagnes de vaccination étant souvent organisées en fin de saison sèche.

Des taux de mortalité correspondant à 5 %, 50 % et 80 % des distributions des taux de mortalité obtenus au cours du suivi ont donc été appliqués pour les scénarios avec les effectivités vaccinales respectives de 95, 50 et 20 %.

⁸ Annexe 2 : Données d'entrée du modèle et méthode de calcul des résultats du modèle, consultable sur le site de l'AEEMA

Figure 2

Modèle stochastique : étapes du calcul effectuées lors de chaque simulation (10 000 simulations et intervalle de confiance de 95 %)



3.2 ÉTAPE 2 - RESULTAT 1 : BENEFICE DE LA VACCINATION CONTRE LA PPCC

La composition finale du troupeau au bout de 12 mois de la situation de référence (sans vaccination) a été comparée à la composition finale du troupeau

en l'absence de mortalité liée à la PPCC et en cas de vaccination pour les trois scénarios. La différence en termes de nombre d'animaux pour chaque catégorie a été multipliée par leur valeur monétaire (en euros) afin d'évaluer, dans le premier cas, les pertes

économiques liées à la PPCC et, pour les trois scénarios avec vaccination, les bénéfices de la vaccination. Ces pertes et/ou bénéfices incluent les pertes directes liées à la mortalité des animaux et le manque à gagner en termes de natalité si les décès concernent des femelles adultes. Les autres coûts directs et indirects (ex. : ceux liés à la morbidité de la maladie ou aux coûts de traitement) n'ont pas été pris en compte par le modèle.

3.3 ÉTAPE 3 - RESULTAT 2 : COÛTS DE LA VACCINATION SEMESTRIELLE CONTRE LA PPCC

Les coûts de la vaccination ont été calculés en considérant une vaccination semestrielle au mois 0 et au mois 6 tel qu'actuellement recommandé par le gouvernement kenyan et l'Union Africaine. Ils ont été obtenus en multipliant le nombre d'animaux présents dans le troupeau au moment de la vaccination par le coût unitaire de cette dernière.

3.4 ÉTAPE 4 - RESULTAT 3 : CALCUL DU RAPPORT COUT-BENEFICE DE LA VACCINATION CONTRE LA PPCC POUR UN TROUPEAU INITIAL DE 100 TETES

Le rapport coût-bénéfice du programme de vaccination semestriel a été évalué en calculant le rapport entre les bénéfices et les coûts de la vaccination pour un troupeau standard de 100 chèvres.

4. OUTILS STATISTIQUES

Le modèle a été conçu sur Microsoft excel (Microsoft® Office 2016, Redmond, WA) avec le logiciel @risk version 7.6 (© Palisade Corporation, Ithaca, NY). Un total de 10 000 simulations de Monte Carlo ont été reproduites afin d'atteindre une convergence de la distribution de probabilités finale avec une tolérance de 1,5 % et un niveau de confiance de 95 %.

II - RÉSULTATS

1. SUIVI LONGITUDINAL

Un total de 20 troupeaux comportant 845 animaux ont été suivis pendant un an. Treize troupeaux étaient localisés en zone agro-pastorale et 7 en zone pastorale (tableau 2). Aucun des troupeaux n'a été vacciné contre la PPCC avant ou pendant l'étude. Les résultats du suivi longitudinal utilisés ont été décrits dans une étude précédente [Renault, 2014]. Les taux de mortalité enregistrés sont de 43 et 37 % pour les jeunes et les adultes respectivement. La principale cause de mortalité rapportée est la PPCC qui représente 47 % des mortalités (57 % chez les adultes et 32,1 % chez les jeunes). La cause de la mortalité était inconnue dans 19 % des cas.

Au cours de l'étude, 65 % des troupeaux suivis ont été affectés par la PPCC qui représente la principale cause de mortalité (21 % pour les adultes et 14 % pour les jeunes).

2. MODELE PROBABILISTE

Les différentes distributions de probabilité issues du suivi et utilisées dans le modèle sont reprises en

Annexe 2⁸. Le test de Welch n'a montré aucune différence saisonnière significative entre la saison sèche et la saison des pluies, les mêmes distributions ont donc été utilisées pour les 12 mois (principe de parcimonie).

L'impact économique de la PPCC en absence de vaccination a été évalué à 1 712,66 euros par an en moyenne pour un troupeau de 100 têtes (minimum de 88,53 euros, maximum de 7 671,21 euros et intervalle de confiance de 95 % allant de 476 à 3 449 euros). Ce résultat a été obtenu en comparant la valeur monétaire du troupeau au bout de 12 mois en l'absence de vaccination et en l'absence de PPCC.

Les bénéfices, les coûts et le rapport coût-bénéfice de la vaccination semestrielle contre la PPCC diminuent en corrélation avec l'effectivité du vaccin (tableau 1 et Annexe 3⁹).

Le rapport coût - bénéfice moyen pour un troupeau de 100 têtes a été estimé respectivement à 62, 27 et 6 pour une effectivité vaccinale de 95, 50 et 20 %. Il diminue donc lorsque l'effectivité vaccinale diminue mais il reste en faveur de la vaccination (rapport >1) quel que soit le scénario.

⁹ Annexe 3 : Distribution de probabilité des résultats du modèle en fonction des différents scénarios (effectivité du vaccin), consultables sur le site de l'AEEMA

3. ANALYSE DE SENSIBILITE

L'analyse de sensibilité montre que les facteurs influençant majoritairement le rapport coût - bénéfice dépendent de l'effectivité vaccinale (figure 3). Pour une effectivité vaccinale de 95 % (figure 3[A]), le facteur principal affectant positivement le rapport coût-bénéfice est le taux de mortalité lié à la PPCC pour les femelles adultes ($r_s = 0,83$). Pour une effectivité vaccinale de 50 %

(figure 3[B]), ce facteur reste le plus important ($r_s = 0,36$) avec une influence également importante du taux de natalité des mâles et des femelles ($r_s = 0,25$). Pour une effectivité vaccinale de 20 % (figure 3[C]), le taux de natalité des jeunes mâles devient le facteur d'influence le plus important ($r_s = 0,55$) avec, en deuxième position, l'influence négative du taux de mortalité des mâles adultes ($r_s = -0,44$).

Tableau 1

Résultats finaux du modèle de calcul du rapport coût-bénéfice pour les trois scénarios d'effectivité vaccinale
(Remarque : coûts calculés en euros)

Résultats	Scénario 1 95 % d'effectivité	Scénario 2 50 % d'effectivité	Scénario 3 20 % d'effectivité
1. Bénéfices annuels de la vaccination contre la PPCC dans un troupeau de 100 têtes			
Minimum	121,22	51,01	2,4
Maximum	6 333,53	2 441,42	923,16
Moyenne	1 533,25	603,07	120,19
Écart-type	688,69	245,65	93,78
Intervalle de confiance à 95 %	436 - 2 973	198 - 1 149	15 - 361
2. Coût annuel de la vaccination semestrielle contre la PPCC dans un troupeau de 100 têtes			
Minimum	18,52	14,49	13,33
Maximum	47,66	38,49	39,35
Moyenne	24,48	21,87	20,10
Écart-type	2,39	2,56	2,78
Intervalle de confiance à 95 %	20,9 - 30,15	17,37 - 27,55	15,32 - 26,09
3. Rapport coût-bénéfice de la vaccination contre la PPCC pour un troupeau de 100 têtes			
Minimum	5,47	2,45	0,17
Maximum	151,87	70,30	32,24
Moyenne	61,87	27,20	5,71
Écart-type	23,82	9,30	3,91
Intervalle de confiance à 95 %	18,9 - 106,9	9,7 - 45,5	0,9 - 15,58

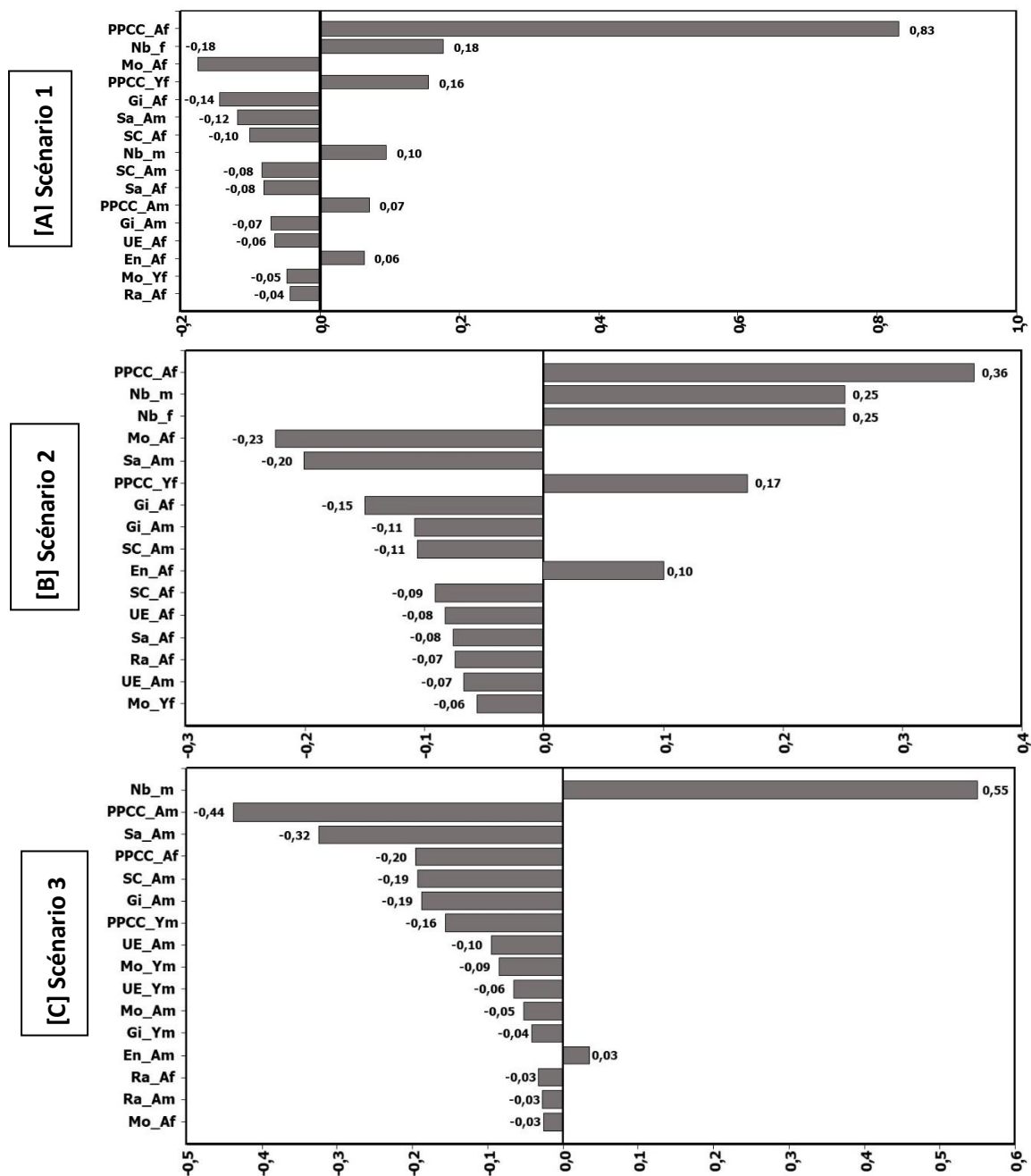
Tableau 2

Caractéristiques des éleveurs et troupeaux suivis

District	Zone agro-écologique	Sexe	Niveau d'éducation	Pratiques en matière de vermifugation	
Turkana Est	10 Pastorale	7 Femme	3 Non alphabétisé	11 Oui	5
Turkana Sud	10 Agro-pastorale	13 Homme	17 Alphabétisé	9 Non	15

Figure 3

Graphique de Tornado montrant les coefficients de corrélation des rangs de Spearman entre les entrées du modèle et le rapport coût-bénéfice des vaccinations semestrielles contre la pleuropneumonie contagieuse caprine pour les trois scénarios d'efficacité vaccinale



Scenario 1 (95 % d'efficacité vaccinale): [A]; Scenario 2 (50 % d'efficacité vaccinale): [B]; Scenario 3 (20 % d'efficacité vaccinale): [C]; PPCC_Af: mortalités dues à la PPCC chez les femelles adultes; PPCC_Am: mortalités dues à la PPCC chez les mâles adultes; PPCC_Yf: mortalités dues à la PPCC chez les jeunes femelles; PPCC_Ym: mortalités dues à la PPCC chez les jeunes mâles; En_Af: taux d'entrée des femelles adultes (hors natalité); En_Am: taux d'entrée des mâles adultes (hors natalité); Gi_Af: sorties volontaires des femelles adultes; Gi_Am: sorties volontaires des mâles adultes; Gi_Ym: sorties volontaires des jeunes mâles; Mo_Af: mortalités des femelles adultes (non lié à la PPCC); Mo_Am: mortalités des mâles adultes (non lié à la PPCC); Mo_Yf: mortalités des jeunes femelles (non lié à la PPCC); Mo_Ym: mortalités des jeunes mâles (non lié à la PPCC); Nb_f: taux de natalité des femelles; Nb_m: taux de natalité mâles; Ra_Af: mortalité due aux pluies des femelles adultes; Ra_Am: mortalité due aux pluies des mâles adultes; Sa_Af: ventes de femelles adultes; Sa_Am: mortalité due aux pluies des mâles adultes; SC_Af: autoconsommation des femelles adultes; SC_Am: autoconsommation des mâles adultes; UE_Af: sorties involontaires de femelles adultes; UE_Am: sorties involontaires de mâles adultes; UE_Ym: sorties involontaires de jeunes mâles.

III - DISCUSSION

La bonne mise en œuvre des campagnes de vaccination au Kenya, dont celle contre la PPCC, fait l'objet d'un grand nombre de contraintes. Ces dernières sont essentiellement liées au manque de volonté des institutions en termes d'investissement et ce du fait de l'absence d'éléments probants de l'efficacité des programmes de contrôle fondés sur la vaccination. De manière à justifier la pertinence des campagnes de vaccination semestrielles contre la PPCC en tant que stratégie de contrôle de la maladie et/ou de protection des moyens de subsistance, certains éléments clés doivent encore être estimés dont, notamment, l'incidence réelle de la maladie, le nombre de mortalités dues à la PPCC chaque année et son impact économique. Cette étude est la première portant sur le rapport coût-bénéfice de la vaccination contre la PPCC en zone pastorale fondée sur des données de suivi longitudinal. Elle fournit une réponse partielle à ces différentes questions.

Si le nombre de troupeaux suivis est relativement faible (20), ces derniers peuvent être considérés comme représentatifs de la zone étant donné qu'ils sont gérés par différents groupes ethniques et sont localisés dans les deux zones agro-écologiques de la région (zones pastorale et agro-pastorale). Le suivi ayant été mené au cours d'une année dont la pluviosité a été rapportée comme moyenne, les données peuvent être considérées comme une référence pour une année « normale ».

1. SUIVI LONGITUDINAL

Les taux de mortalité liés à la PPCC relevés au cours du suivi sont inférieurs à ceux d'une étude précédente qui rapportait un taux de mortalité de 62,5 % avec une incidence de 25 % [Bett *et al.*, 2009]. La cause de cette différence pourrait être liée à la définition de cas utilisé pour enregistrer les mortalités dues à la PPCC. En effet, seuls les cas de mortalité où les signes post-mortem de pleuropneumonie fibrineuse ont été rapportés par l'éleveur ont été considérés comme dus à la PPCC. Cette définition de cas engendre un risque important de sous-diagnostic étant donné que certains animaux meurent sans présenter les signes *post-mortem* caractéristiques ou ne font pas l'objet d'une analyse *post-mortem*. Il est à noter qu'il pourrait également y avoir confusion avec d'autres maladies pouvant entraîner des lésions similaires telles que la peste des petits ruminants, la pasteurellose et les infections par d'autres mycoplasmes [Thiaucourt *et al.*, 1996]. L'étude repose sur l'hypothèse que cette définition du cas entraîne une sous-estimation du nombre total de mortalités dues à la PPCC suite à une prédominance des cas non diagnostiqués comme tels

par rapport aux cas erronément rapportés comme dû à la PPCC. Cette hypothèse semble réaliste étant donné que la maladie et ses signes nécropsiques sont bien connus par les éleveurs en zone enzootique [Asmare *et al.*, 2016].

2. MODELE PROBABILISTE

Malgré les tendances saisonnières observées au cours du suivi longitudinal, aucune différence significative des différents taux n'a pu être mise en évidence entre la saison des pluies et la saison sèche. Il est fort probable que des différences saisonnières existent mais que, suite au faible nombre de troupeaux suivi, elles n'aient pas pu être mises en évidence. En l'absence de variation saisonnière significative, les mêmes distributions de probabilité ont été utilisées sur les douze mois. Néanmoins, les données ont été gardées désagrégées afin de pouvoir ajuster le modèle plus facilement dans le futur.

Sur base du modèle, les pertes économiques annuelles totales dues à la PPCC ont été estimées à 1 712,66 € en moyenne pour un troupeau standard de 100 têtes. Ce chiffre ne prend en compte que les pertes économiques directes liées à la mortalité ainsi que la perte indirecte due à la baisse du nombre de naissances en cas de mortalité de femelles adultes. Il représente une perte journalière de 4,7 € pour un seuil de pauvreté fixé à 1,5 € (dernière mise à jour de la banque mondiale fondée sur les prix de 2011). La PPCC a donc un impact économique important sur les moyens de subsistance des populations du comté de Turkana dont la majorité vit de l'élevage. Le comté de Turkana compte 6 millions de chèvres [KNBS, 2009], soit 60 000 troupeaux de 100 chèvres. En considérant que 65 % des troupeaux suivis ont été affectés par la maladie au cours de l'étude (incidence troupeau), l'estimation des pertes économiques à l'échelle du comté s'élèverait annuellement à 66 793 740 euros. En considérant une incidence troupeau de 25 % tel que rapporté par une étude antérieure [Bett *et al.*, 2009], les pertes seraient de l'ordre de 25 689 900 euros par an en moyenne.

Si l'on compare les différents résultats du modèle pour les trois scénarios (tableau 1), il ressort que plus l'efficacité vaccinale est grande, plus les bénéfices, et donc le rapport coût-bénéfice est grand. Cela semble logique étant donné qu'un plus grand nombre d'animaux est protégé de la maladie, ce qui réduit les pertes. Le coût des vaccinations semestrielles diminue en cas de faible efficacité vaccinale. Cela s'explique par un plus grand nombre de mortalités au cours des six premiers mois qui diminue le nombre

d'animaux à vacciner lors du rappel. Dans le scénario trois, le moins favorable avec une effectivité vaccinale de 20 %, le rapport coût-bénéfice reste en faveur de la vaccination avec une valeur moyenne de 5,7. Si l'intervalle de confiance à 95 % s'étend de 0,9 à 15,58, on peut néanmoins considérer que le rapport réel est supérieur à 1 dans 95 % des cas du fait que le modèle sous-estime les bénéfices de la vaccination en sous-estimant les pertes directes et indirectes liées à la PPCC. En effet, comme dit précédemment, le modèle ne prend en compte que les coûts directs de mortalités et non les coûts indirects liés, par exemple, à une baisse de production, à des avortements et au traitement. L'hypothèse d'une sous-estimation liée à la définition du cas, voir plus haut, entraîne également une sous-estimation des pertes et donc des bénéfices. Les campagnes de vaccination semestrielles sont donc tout à fait justifiées et à promouvoir sur le plan économique en vue de protéger les moyens de subsistance des populations et augmenter la sécurité alimentaire dans la région.

Une meilleure effectivité vaccinale ($\geq 50\%$) est néanmoins nécessaire en vue d'obtenir des résultats durables sur le plan de la protection des moyens de subsistance et du cheptel reproducteur mais également en termes de contrôle de la maladie. Une meilleure effectivité vaccinale permettrait en outre d'améliorer la perception actuellement négative des éleveurs vis-à-vis de ce vaccin en vue d'augmenter le taux de couverture vaccinale à des niveaux suffisants pour pouvoir éradiquer la maladie. Cette mauvaise perception est liée à différents facteurs dont l'effectivité du vaccin perçue comme faible et le nombre important d'effets secondaire répertoriés dans le passé du fait de l'utilisation de vaccins de mauvaise qualité et du non-respect du protocole par les agents vaccinateurs [Lipner et Brown, 1995].

Étant donné la faible accessibilité aux services de santé animale dans la zone, la surveillance sanitaire et les services de santé animale de proximité ne sont actuellement que faiblement opérationnels, ce qui affecte la bonne mise en œuvre des campagnes de vaccination et des programmes de contrôle [Bett *et al.*, 2009]. Connaissant l'impact économique de la PPCC, une plus grande efficacité des campagnes de vaccination est nécessaire dans les meilleurs délais afin d'assurer la protection du cheptel reproducteur à long terme et de modifier la perception négative des éleveurs vis-à-vis de la vaccination en vue d'augmenter le taux de couverture vaccinale. Cela requiert des moyens additionnels pour la chaîne de production mais également une meilleure mise en œuvre des campagnes de vaccination avec un respect de la chaîne de froid, une programmation optimale et une formation adéquate et continue des agents vaccinateurs sur le terrain. Un service de santé animale de proximité est également nécessaire en

vue de pouvoir mieux organiser les campagnes de vaccination et disposer d'un mécanisme de surveillance et de détection précoce des maladies dans la zone [Lipner et Brown, 1995 ; Matios *et al.*, 2014]. Sur base de l'accord de Maputo [World Bank, 2010], des fonds gouvernementaux devraient également être disponibles localement en vue de couvrir les frais liés à l'organisation des campagnes de vaccination et, ce, indépendamment des éventuels financements octroyés par les organismes internationaux qui ne sont pas toujours disponibles au moment opportun.

En l'absence d'études d'efficacité du vaccin Caprivax TM sur le terrain, le scénario idéal a été fondé sur une étude d'efficacité du vaccin en conditions expérimentale [Rurangirwa *et al.*, 1991] et les deux autres scénarios l'ont été sur une opinion d'experts prenant en compte la perte d'efficacité liée aux conditions de mise en œuvre de la campagne de vaccination. Le scénario le plus probable estime l'effectivité vaccinale à 20 %. Il serait intéressant à l'avenir de mener des études permettant de mesurer l'effectivité vaccinale dans le cadre des campagnes de vaccination et la durée de couverture immunitaire suite à la vaccination (en vue de confirmer la nécessité de réaliser des rappels semestriels). De telles études demanderaient l'identification préalable d'animaux non vaccinés et des tests sérologiques visant à mesurer les taux d'anticorps avant vaccination et après vaccination (à intervalles réguliers). La principale difficulté étant l'accessibilité de la zone et des animaux au cours de l'étude étant donné la mobilité des troupeaux et les difficultés d'accès en saison des pluies.

3. ANALYSE DE SENSIBILITE

Les résultats de l'analyse de sensibilité pour le rapport coût-bénéfice sont différents en fonction de l'effectivité vaccinale. En cas d'effectivité vaccinale de 20 %, le principal facteur est le taux de natalité des jeunes mâles ($r_s = 0,55$) et la mortalité des mâles adultes, soit la valeur économique des animaux présents dans le troupeau, ces deux catégories rapportant le plus d'argent sur le marché. Pour les scénarios 1 et 2 avec une effectivité vaccinale de 95 et 50 % respectivement, le principal facteur influençant le rapport coût-bénéfice est le taux de mortalité des femelles adultes ($r_s = 0,83$ et $0,36$ respectivement). La différence est due au taux réduit de protection du cheptel dans le scénario 3 avec, de ce fait, une faible différence en termes de composition du troupeau au bout d'un an que l'on vaccine ou pas. Les animaux ayant la plus grande valeur économique sont donc ceux rapportant le plus de bénéfices. En cas d'effectivité vaccinale plus importante, la composition de troupeau en fin d'année est fortement différente, non seulement du

fait du nombre moindre d'animaux morts mais également des naissances qui est influencé directement par le nombre de femelles adultes présentes dans le troupeau. Le nombre de femelles

reproductrices influence ainsi fortement la composition finale du troupeau et donc le bénéfice escompté de la vaccination.

IV - CONCLUSION

Le rapport coût-bénéfice de la vaccination contre la PPCC reste favorable à cette dernière dans les trois scénarios. Les bénéfices économiques apportés par la vaccination aux éleveurs restent supérieurs au coût des vaccinations semestrielles même en cas d'effectivité vaccinale limitée à 20 %. Le programme de vaccination est donc justifié sur le plan économique en tant que mesure de protection des moyens de subsistance. Il permet d'améliorer la

sécurité alimentaire dans la zone. Néanmoins, sur le plan de la santé animale et afin d'obtenir des effets durables, une amélioration de l'effectivité vaccinale est nécessaire. Il est donc important d'assurer la production de vaccins de qualité mais également des conditions de stockage et d'utilisation suffisantes à travers le respect de la chaîne de froid et des bonnes pratiques de vaccination.

BIBLIOGRAPHIE

- Asmare K., Abayneh T., Mekuria S., Ayelet G., Sibhat B., Skjerve E., Wieland B. - A meta-analysis of contagious caprine pleuropneumonia (CCPP) in Ethiopia. *Acta Tropica*, 2016, **158**, 231-239.
<https://doi.org/10.1016/J.ACTATROPICA.2016.02.023>
- AU-IBAR. - Standard Methods and Procedures for control of Contagious Caprine Pleuropneumonia in the Greater Horn of Africa, 2016, Nairobi.
- Bett B., Jost C., Allport R., Mariner J. - Using participatory epidemiological techniques to estimate the relative incidence and impact on livelihoods of livestock diseases amongst nomadic pastoralists in Turkana South District, Kenya. *Preventive Veterinary Medicine*, 2009, **90**(3-4), 194-203.
<https://doi.org/10.1016/J.PREVETMED.2009.05.001>
- County M., Lepenoi Lekapana P. - Socioeconomic impacts of drought on pastoralists, their coping strategies, and government interventions in Marsabit County, Kenya, 2013.
[http://erepository.uonbi.ac.ke/bitstream/handle/11295/57940/Lekapana_Socioeconomic impacts of drought on pastoralists%2C their coping strategies%2C and government interventions in Marsabit County%2C Kenya.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://erepository.uonbi.ac.ke/bitstream/handle/11295/57940/Lekapana_Socioeconomic%20impacts%20of%20drought%20on%20pastoralists%20and%20government%20interventions%20in%20Marsabit%20County%20Kenya.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Ebei A.P., Oba G., Akuja T. - Long-term impacts of droughts on pastoral production and trends in poverty in north-western Kenya: An evaluation of 14-year drought early warning data series. In J. M. Sánchez (Ed.), *Droughts : causes, effects and predictions*, 2008 (p. 358). Nova Science Publishers.
https://www.novapublishers.com/catalog/product_info.php?products_id=6815
- FAO - Disaster risk reduction: FSNWG, 2013.
<http://www.fao.org/disasterriskreduction/east-central-africa/fsnwg/en/>
- Fitzgibbon C. - *Economics of Resilience Study - Kenya Country Report KENYA -COUNTRY CONTEXT*, 2012. Nairobi.
https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/228500/TEERR_Kenya_Background_Report.pdf
- Gouvernement of Kenya. - *Kenya integrated household budget survey*. Nairobi, 2006.
http://catalog.ihsn.org/index.php/catalog/1472/related_materials
- King A., Mark L., Browne S., Bush J., Lecumberri N. - *Livelihood Profiles: Six Livelihood Zones in Turkana County, Kenya*. Nairobi, 2012.

- Kipronoh A.K., Ombui J.N., Kiara H.K., Binopal Y.S., Gitonga E., Wesonga H. O. - Prevalence of contagious caprine pleuro-pneumonia in pastoral flocks of goats in the Rift Valley region of Kenya. *Tropical Animal Health and Production*, 2016, **48**(1), 151-155.
<https://doi.org/10.1007/s11250-015-0934-0>
- KNBS - 2009 Kenya Population and Housing Census (10 Per Cent sample, every 10th household), Population and Housing Census.
<http://54.213.151.253/nada/index.php/catalog/55>
- Lefèvre P.-C., Thiaucourt F. - Contagious caprine pleuropneumonia. In J. A. W. Coetzer, G. R. Thomson, J. MacLachlan, A. Michel, C. Botha (Eds.), *Infectious Diseases of Livestock* (Anipedia, 2018, pp. 2060-2065).
<https://doi.org/10.1079/9780851990125.0114>
- Lesnoff M., Lancelot R., Moulin C.-H. - *Calcul des taux démographiques dans les cheptels domestiques tropicaux Approche en temps discret.* (Quae, Ed.) 2007. Editions Quae.
<http://www.quae.com/fr/r1284-calcul-des-taux-demographiques-dans-les-cheptels-domestiques-tropicaux.html>
- Lipner M.E., Brown R.B. - Constraints to the integration of the contagious caprine pleuropneumonia (CCPP) vaccine into Kenya's animal health delivery system. *Agriculture and Human Values*, 1995, **12**(2), 19-28.
<https://doi.org/10.1007/BF02217293>
- Matios L., Tesfaye S., Gelagay A., Eyob E., Gebremikael D., Tadele T. - Seroprevalence of contagious caprine pleuropneumonia and field performance of inactivated vaccine in Borana pastoral area, southern Ethiopia. *African Journal of Microbiology Research*, 2014, **8**(24), 2344-2351.
<https://doi.org/10.5897/AJMR2014.6806>
- Opiyo F., Wasonga O., Nyangito M., Schilling J., Munang R. - Drought Adaptation and Coping Strategies Among the Turkana Pastoralists of Northern Kenya. *International Journal of Disaster Risk Science*, 2015, **6**(3), 295-309.
<https://doi.org/10.1007/s13753-015-0063-4>
- Peyraud A., Poumarat F., Tardy F., Manso-Silvan L., Hamroev K., Tilloev T., Thiaucourt F. - An international collaborative study to determine the prevalence of contagious caprine pleuropneumonia by monoclonal antibody-based cELISA. *BMC Veterinary Research*, 2014, **10**, 48.
<https://doi.org/10.1186/1746-6148-10-48>
- Renault V. - *Herd dynamics and economic impact of diseases of smallstock in the Turkana region of Kenya.* Institute of Tropical Medicine, Annvers, 2014.
- Rurangirwa F.R., McGuire T.C. - Contagious caprine pleuropneumonia: Diagnosis and control. Retrieved January 25, 2018, from:
<http://www.fao.org/wairdocs/ilri/x5473b/x5473b11.htm>
- Rurangirwa F.R., McGuire T.C., Mbai L., Ndung'u L., Wambugu A. - Preliminary field test of lyophilised contagious caprine pleuropneumonia vaccine. *Research in Veterinary Science*, 1991, **50**(2), 240-241.
[https://doi.org/10.1016/0034-5288\(91\)90114-4](https://doi.org/10.1016/0034-5288(91)90114-4)
- Thiaucourt F., Bolske G. - Contagious caprine pleuropneumonia and other pulmonary mycoplasmoses of sheep and goats. *Revue Scientifique et Technique de l'OIE*, 1996, **15**(4), 1397-1414.
<https://doi.org/10.20506/rst.15.4.990>
- Thiaucourt F., Bolske G., Leneguersh B., Smith D., Wesonga H. - Diagnosis and control of contagious caprine pleuropneumonia. *Revue Scientifique et Technique (International Office of Epizootics)*, 1996, **15**(4), 1415-1429.
<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/9190021>



Remerciements

Le suivi longitudinal qui a permis l'enregistrement des données a été finance par ECHO dans le cadre d'un projet d'aide au développement mis en oeuvre par un consortium de cinq ONG internationales dans les zones arides et semi-arides du Kenya. Les données utilisées ont été fournies par Vétérinaires Sans Frontières Belgique (VSF-B). Nous aimerions remercier tous les acteurs ayant permis la collecte et l'enregistrement de ces données et plus particulièrement les équipes de VSF-B au Turkana et leur partenaire local qui ont accepté de collecter des éléments additionnels pour les besoins de cette étude.

Nos remerciements également à François Thiaucourt, expert OIE pour la pleuropneumonie contagieuse bovine et caprine travaillant au Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (CIRAD), pour son opinion d'expert fournie en vue de choisir les différents scénarios à utiliser dans le cadre de cette étude

Annexe 1

Taux d'entrées et de sorties enregistrés au cours du suivi longitudinal

	Libellé	Taux mensuels		
		moyen	minimum	maximum
Mortalités	Mortalités non dues à la PPCC des femelles adultes	0,01	0,00	0,03
	Mortalités non dues à la PPCC des mâles adultes	0,00	0,00	0,02
	Mortalités non dues à la PPCC chez les jeunes femelles	0,02	0,00	0,04
	Mortalités non dues à la PPCC chez les jeunes mâles	0,02	0,00	0,06
	Mortalités dues à la pluie des femelles adultes	0,00	0,00	0,01
	Mortalités dues à la pluie in adultes males	0,04	0,00	0,09
	Mortalités dues à la pluie chez les jeunes femelles	0,01	0,00	0,07
	Mortalités dues à la pluie chez les jeunes mâles	0,00	0,00	0,04
	Mortalités dues à la PPCC des femelles adultes	0,02	0,01	0,04
	Mortalités dues à la PPCC des mâles adultes	0,02	0,00	0,06
	Mortalités dues à la PPCC chez les jeunes femelles	0,01	0,00	0,04
	Mortalités dues à la PPCC chez les jeunes mâles	0,01	0,00	0,11
Autres sorties	Ventes des femelles adultes	0,00	0,00	0,01
	Ventes des mâles adultes	0,04	0,00	0,09
	Ventes chez les jeunes femelles	0,00	0,00	0,02
	Ventes chez les jeunes mâles	0,01	0,00	0,03
	Autoconsommation des femelles adultes	0,00	0,00	0,01
	Autoconsommation des mâles adultes	0,02	0,00	0,03
	Autoconsommation chez les jeunes femelles	0,00	0,00	0,01
	Autoconsommation chez les jeunes mâles	0,01	0,00	0,03
	Autres sorties (ex. : don, dot) des femelles adultes	0,01	0,00	0,03
	Autres sorties (ex. : don, dot) des mâles adultes	0,01	0,00	0,03
	Autres sorties (ex. : don, dot) chez les jeunes femelles	0,02	0,00	0,04
	Autres sorties (ex. : don, dot) chez les jeunes mâles	0,01	0,00	0,03
	Pertes (ex. : prédateurs, vol) des femelles adultes	0,01	0,00	0,03
	Pertes (ex. : prédateurs, vol) des mâles adultes	0,01	0,00	0,04
	Pertes (ex. : prédateurs, vol) chez les jeunes femelles	0,01	0,00	0,02
	Pertes (ex. : prédateurs, vol) chez les jeunes mâles	0,03	0,00	0,08
Entrées	Entrées (achats, cadeaux, raids) des femelles adultes	0,01	0,00	0,03
	Entrées (achats, cadeaux, raids) des mâles adultes	0,03	0,01	0,10
	Entrées (achats, cadeaux, raids) chez les jeunes femelles	0,01	0,00	0,03
	Entrées (achats, cadeaux, raids) chez les jeunes mâles	0,02	0,01	0,03
	Naissances (femelles)	0,06	0,02	0,10
	Naissances (mâles)	0,04	0,02	0,08

Annexe 2

Données d'entrée du modèle et méthodes de calcul des résultats du modèle

A - DONNÉES D'ENTRÉE	ABRÉVIATION	CALCUL	UNITÉ	DESCRIPTION ET/OU ORIGINE
1. VALEURS DE DEPART				
Nombre de femelles adultes dans le troupeau à T ₀	N ₀ _Af	Fixe= 54	Têtes	Données du suivi : moyenne pour un troupeau de 100 têtes
Nombre de mâles adultes dans le troupeau à T ₀	N ₀ _Am	Fixe = 18	Têtes	
Nombre de jeunes femelles dans le troupeau à T ₀	N ₀ _Yf	Fixe = 16	Têtes	
Nombre de jeunes mâles dans le troupeau à T ₀	N ₀ _Ym	Fixe = 12	Têtes	
Valeur monétaire des femelles adultes	MV_Af	Fixe= 41,34	Euros	Suivis mensuels des marchés à bestiaux (Ministère de l'élevage et ILRI), données de 2017
Valeur monétaire des mâles adultes	MV_Am	Fixe= 44,52	Euros	
Valeur monétaire des jeunes femelles	MV_Yf	Fixe= 8,74	Euros	
Valeur monétaire des jeunes mâles	MV_Ym	Fixe= 11,92	Euros	
Coût unitaire (par tête) de la vaccination contre la PPCC	UCV	Fixe = 0,12	Euros	Communication personnelle des services vétérinaires du comté de Turkana
2. ENTREES				
Taux moyen de jeunes femelles passant à la catégorie adulte (première mise-bas)	CC_Yf	Fixe = 0.061	Taux	Données du suivi : Taux moyen
Taux de natalité des femelles	Nb_f	Distribution exponentielle, $\lambda=0,046746$	Taux	Distribution ajustée des données du suivi
Taux de natalité des mâles	Nb_m	Distribution exponentielle, $\lambda=0,033219$	Taux	
Taux d'entrée des femelles adultes (achats et cadeaux)	En_Af	Distribution exponentielle, $\lambda=0,0053239$	Taux	
Taux d'entrée des mâles adultes (achats et cadeaux)	En_Am	Distribution exponentielle, $\lambda=0,0079603$	Taux	
Taux d'entrée des jeunes femelles (achats et cadeaux)	En_Yf	Distribution exponentielle, $\lambda=0,0030984$	Taux	
Taux d'entrée des jeunes mâles (achats et cadeaux)	En_Ym	Distribution exponentielle, $\lambda=0,0036537$	Taux	

3. SORTIES			
Taux de mortalité dû à la PPCC chez les femelles adultes	CCPP_Af	Distribution exponentielle, $\lambda=0,11764$	Taux
Taux de mortalité dû à la PPCC chez les mâles adultes	CCPP_Am	Distribution exponentielle, $\lambda=0,089162$	Taux
Taux de mortalité dû à la PPCC chez les jeunes femelles	CCPP_Yf	Distribution exponentielle, $\lambda=0,064848$	Taux
Taux de mortalité dû à la PPCC chez les jeunes mâles	CCPP_Ym	Distribution exponentielle, $\lambda=0,081337$	Taux
Taux de mortalité non dû à la PPCC chez les femelles adultes	Mo_Af	Distribution exponentielle, $\lambda=0,014563$	Taux
Taux de mortalité non dû à la PPCC chez les mâles adultes	Mo_Am	Distribution exponentielle, $\lambda=0,0047315$	Taux
Taux de mortalité non dû à la PPCC chez les jeunes femelles	Mo_Yf	Distribution exponentielle, $\lambda=0,021413$	Taux
Taux de mortalité non dû à la PPCC chez les jeunes mâles	Mo_Ym	Distribution exponentielle, $\lambda=0,039267$	Taux
Taux de mortalité dû aux pluies chez les femelles adultes	Ra_Af	Distribution exponentielle, $\lambda=0,0043627$	Taux
Taux de mortalité dû aux pluies chez les des mâles adultes	Ra_Am	Distribution exponentielle, $\lambda=0,0037838$	Taux
Taux de mortalité dû aux pluies chez les jeunes femelles	Ra_Yf	Distribution exponentielle, $\lambda=0,0067236$	Taux
Taux de mortalité dû aux pluies chez les des jeunes mâles	Ra_Ym	Distribution exponentielle, $\lambda=0,013089$	Taux
Taux de vente des femelles adultes	Sa_Af	Distribution exponentielle, $\lambda=0,0052527$	Taux
Taux de vente des mâles adultes	Sa_Am	Distribution exponentielle, $\lambda=0,059425$	Taux
Taux de vente des jeunes femelles	Sa_Yf	Distribution exponentielle, $\lambda=0,0051134$	Taux
Taux de vente des jeunes mâles	Sa_Ym	Distribution exponentielle, $\lambda=0,0091216$	Taux

Distribution ajustée des données du suivi

Distribution ajustée des données du suivi

Taux d'autoconsommation des femelles adultes	SC_Af	Distribution exponentielle, $\lambda=0,0059826$	Taux	
Taux d'autoconsommation des mâles adultes	SC_Am	Distribution exponentielle, $\lambda=0,031769$	Taux	
Taux d'autoconsommation des jeunes femelles	SC_Yf	Distribution exponentielle, $\lambda=0,0004274$	Taux	
Taux d'autoconsommation des jeunes mâles	SC_Ym	Distribution exponentielle, $\lambda=0,01076$	Taux	
Sorties involontaires (vols, pertes, prédateurs) des femelles adultes	UE_Af	Distribution exponentielle, $\lambda=0,0056201$	Taux	Distribution ajustée des données du suivi
Sorties involontaires (vols, pertes, prédateurs) des mâles adultes	UE_Am	Distribution exponentielle, $\lambda=0,015189$	Taux	
Sorties involontaires (vols, pertes, prédateurs) des jeunes femelles	UE_Yf	Distribution exponentielle, $\lambda=0,0099263$	Taux	
Sorties involontaires (vols, pertes, prédateurs) des jeunes mâles	UE_Ym	Distribution exponentielle, $\lambda=0,029688$	Taux	
Sorties volontaires (dons, dot) des femelles adultes	Gi_Af	Distribution exponentielle, $\lambda=0,0099263$	Taux	
Sorties volontaires (dons, dot) des mâles adultes	Gi_Am	Distribution exponentielle, $\lambda=0,029688$	Taux	
Sorties volontaires (dons, dot) des jeunes femelles	Gi_Yf	Distribution exponentielle, $\lambda=0,010402$	Taux	
Sorties volontaires (dons, dot) des jeunes mâles	Gi_Ym	Distribution exponentielle, $\lambda=0,0065263$	Taux	

B - RÉSULTATS DU MODÈLE	ABRÉVIATION	CALCUL	UNITÉ	DESCRIPTION ET/OU ORIGINE
1. TAUX DE SORTIE NON LIÉ À LA PPCC				
Taux de sortie non lié à la PPCC des femelles adultes	Ex_Af	Calculé	Taux	=Mo_Af+Ra_Af+Sa_Af+SC_Af+UE_Af+Gi_Af
Taux de sortie non lié à la PPCC des mâles adultes	Ex_Am	Calculé	Taux	=Mo_Am+Ra_Am+Sa_Am+SC_Am+UE_Am+Gi_Am
Taux de sortie non lié à la PPCC des jeunes femelles	Ex_Yf	Calculé	Taux	=Mo_Yf+Ra_Yf+Sa_Yf+SC_Yf+UE_Yf+Gi_Yf
Taux de sortie non lié à la PPCC des jeunes mâles	Ex_Ym	Calculé	Taux	=Mo_Ym+Ra_Ym+Sa_Ym+SC_Ym+UE_Ym+Gi_Ym

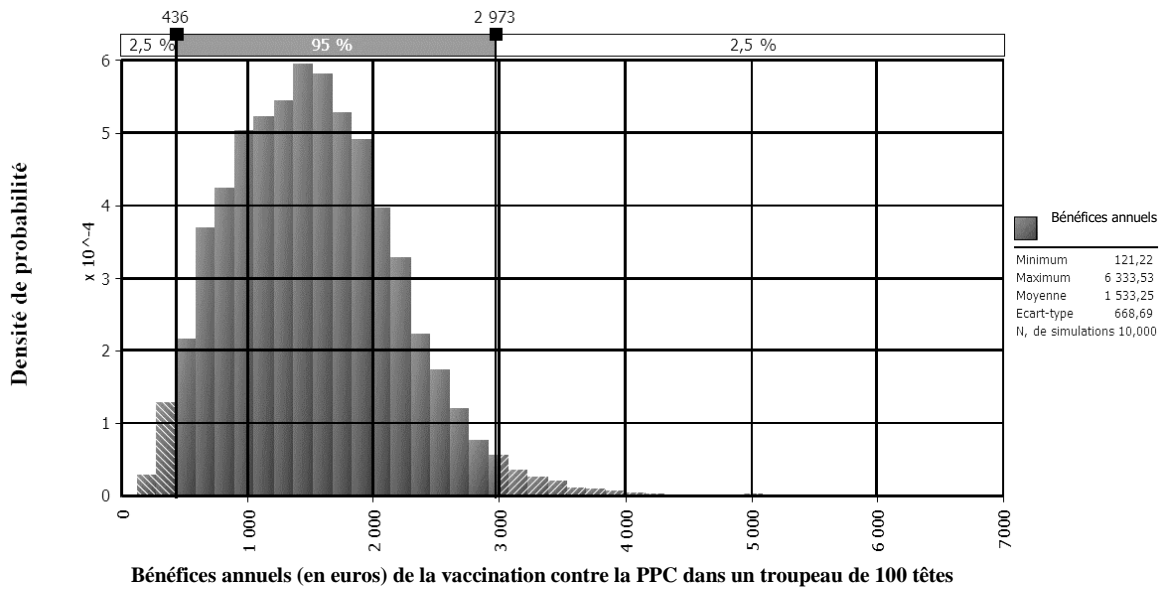
2. TAUX DE SORTIE DÛ À LA PPCC				
2.1 Taux de sortie dû à la PPCC en l'absence de vaccination				
Taux de sortie dû à la PPCC des femelles adultes sans vaccination	ExNV_Af	Calculé	Taux	=Ex_Af +CCPP_Af
Taux de sortie dû à la PPCC des mâles adultes sans vaccination	ExNV_Am	Calculé	Taux	=Ex_Af +CCPP_Am
Taux de sortie dû à la PPCC des jeunes femelles sans vaccination	ExNV_Yf	Calculé	Taux	=Ex_Af +CCPP_Yf
Taux de sortie dû à la PPCC des jeunes mâles sans vaccination	ExNV_Ym	Calculé	Taux	=Ex_Af +CCPP_Ym
2.2 Taux de sortie dû à la PPCC en cas de vaccination avec une effectivité de X%				
Taux de sortie dû à la PPCC des femelles adultes en cas de vaccination avec une effectivité de X%	ExV_Af	Calculé	Taux	=Ex_Af +CCPP_Af*(100-XX)
Taux de sortie dû à la PPCC des mâles adultes en cas de vaccination avec une effectivité de X%	ExV_Am	Calculé	Taux	=Ex_Af +CCPP_Am*(100-XX)
Taux de sortie dû à la PPCC jeunes femelles en cas de vaccination avec une effectivité de X%	ExV_Yf	Calculé	Taux	=Ex_Af +CCPP_Yf*(100-XX)
Taux de sortie dû à la PPCC des jeunes mâles en cas de vaccination avec une effectivité de X%	ExV_Ym	Calculé	Taux	=Ex_Af +CCPP_Ym*(100-XX)
3. DYNAMIQUE DE TROUPEAU AU COURS DE L'ANNÉE				
3.1 Évolution sur un an en cas de vaccination (Mois 0 à 12)				
Nombre de femelles adultes Mois (x)	N_{x_Af}	Calculé	Têtes	$N_{x_Af}=N_{(x-1)_Af} + CC_Yf *N_{(x-1)_Yf} + (En_Af - ExV_Af) * N_{(x-1)_Af}$
Nombre de mâles adultes Mois (x)	N_{x_Am}	Calculé	Têtes	$N_{x_Am}=N_{(x-1)_Am} + (En_Am - ExV_Am) * N_{(x-1)_Am}$
Nombre de jeunes femelles Mois (x)	N_{x_Yf}	Calculé	Têtes	$N_{x_Yf}=N_{(x-1)_Yf} + Nb_F *N_{(x-1)_Af} + (En_Yf - CC_Yf - ExV_Yf) *N_{(x-1)_Yf}$
Nombre de jeunes mâles Mois (x)	N_{x_Ym}	Calculé	Têtes	$N_{x_Ym}=N_{(x-1)_Ym} + Nb_M *N_{(x-1)_Af} + (En_Ym - ExV_Ym) *N_{(x-1)_Ym}$

3.2 Évolution sur un an en l'absence de vaccination (Mois 0 à 12)				
Nombre de femelles adultes Mois (x)	N_{x_Af}	Calculé	Têtes	$N_{x_Af} = N_{(x-1)_Af} + CC_Yf * N_{(x-1)_Yf} + (En_Af - ExNV_Af) * N_{(x-1)_Af}$
Nombre de mâles adultes Mois (x)	N_{x_Am}	Calculé	Têtes	$N_{x_Am} = N_{(x-1)_Am} + (En_Am - ExNV_Am) * N_{(x-1)_Am}$
Nombre de jeunes femelles Mois (x)	N_{x_Yf}	Calculé	Têtes	$N_{x_Yf} = N_{(x-1)_Yf} + Nb_F * N_{(x-1)_Af} + (En_Yf - CC_Yf - ExNV_Yf) * N_{(x-1)_Yf}$
Nombre de jeunes mâles Mois (x)	N_{x_Ym}	Calculé	Têtes	$N_{x_Ym} = N_{(x-1)_Ym} + Nb_M * N_{(x-1)_Af} + (En_Ym - ExNV_Ym) * N_{(x-1)_Ym}$
4. COÛTS LIÉS AUX MORTALITÉS LIÉES À LA PPCC				
4.1 Pertes additionnelles dues à la PPCC				
Pertes de femelles adultes	L_Af	Calculé	Têtes	Pertes = N_{12_Af} avec vaccination - N_{12_Af} sans vaccination
Pertes de mâles adultes	L_Am	Calculé	Têtes	Losses = N_{12_Am} avec vaccination - N_{12_Am} sans vaccination
Pertes de jeunes femelles	L_Yf	Calculé	Têtes	Pertes = N_{12_Yf} avec vaccination - N_{12_Yf} sans vaccination
Pertes de jeunes mâles	L_Ym	Calculé	Têtes	Pertes = N_{12_Ym} avec vaccination - N_{12_Ym} sans vaccination
4.2 Bénéfices annuels générés par la vaccination contre la PPCC dans un troupeau de 100 têtes				
Mortalités évitées pour les femelles adultes	Co_Af	Calculé	Euros	= $L_Af * MV_Af$
Mortalités évitées pour les mâles adultes	Co_Am	Calculé	Euros	= $L_Am * MV_Am$
Mortalités évitées pour les jeunes femelles	Co_Yf	Calculé	Euros	= $L_Yf * MV_Yf$
Mortalités évitées pour les jeunes mâles	Co_Ym	Calculé	Euros	= $L_Ym * MV_Ym$
5. COÛTS DE LA VACCINATION SEMESTRIELLE				
Coût pour le premier vaccin T_0	CV_1	Calculé	Euros	= $(N_0_Af + N_0_Am + N_0_Yf + N_0_Ym) * UCV$
Coût pour le second vaccin Mois 6	CV_2	Calculé	Euros	= $(N_6_Af + N_6_Am + N_6_Yf + N_6_Ym) * UCV$
6. RESULTATS FINAUX				
Bénéfices annuels générés par la vaccination contre la PPCC dans un troupeau de 100 têtes	Co_CCPP	Calculé	Euros	= $Co_Af + Co_Am + Co_Yf + Co_Ym$
Coût annuel d'une vaccination semestrielle contre la PPCC dans un troupeau de 100 têtes	TCV	Calculé	Euros	= $CV_1 + CV_2$
Ratio coût / bénéfice du programme de vaccination contre la PPCC	Rapport	Calculé		= Co_CCPP / TCV

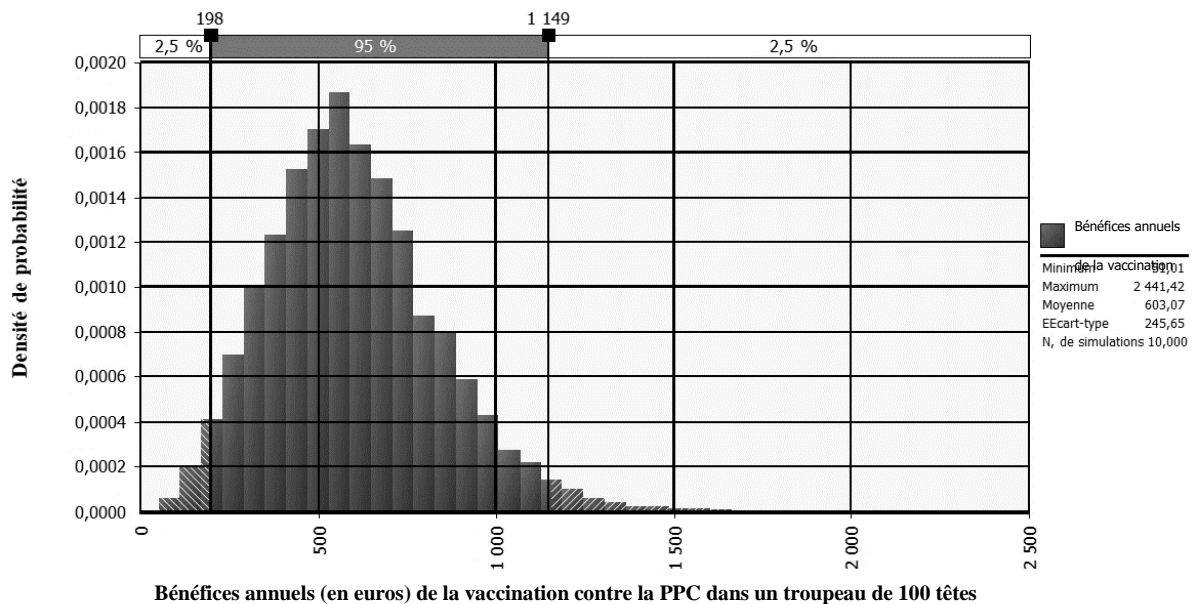
Annexe 3

Distribution de probabilité des résultats du modèle en fonction des différents scénarios (effectivité du vaccin)

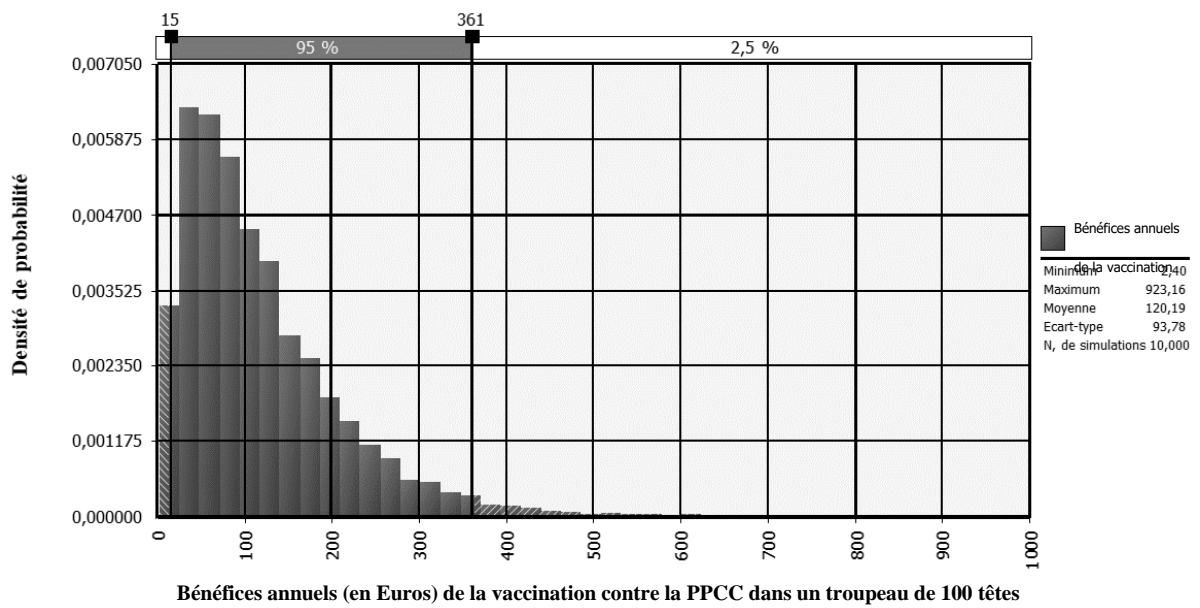
[A] Scénario 1 (95 % d'effectivité vaccinale)



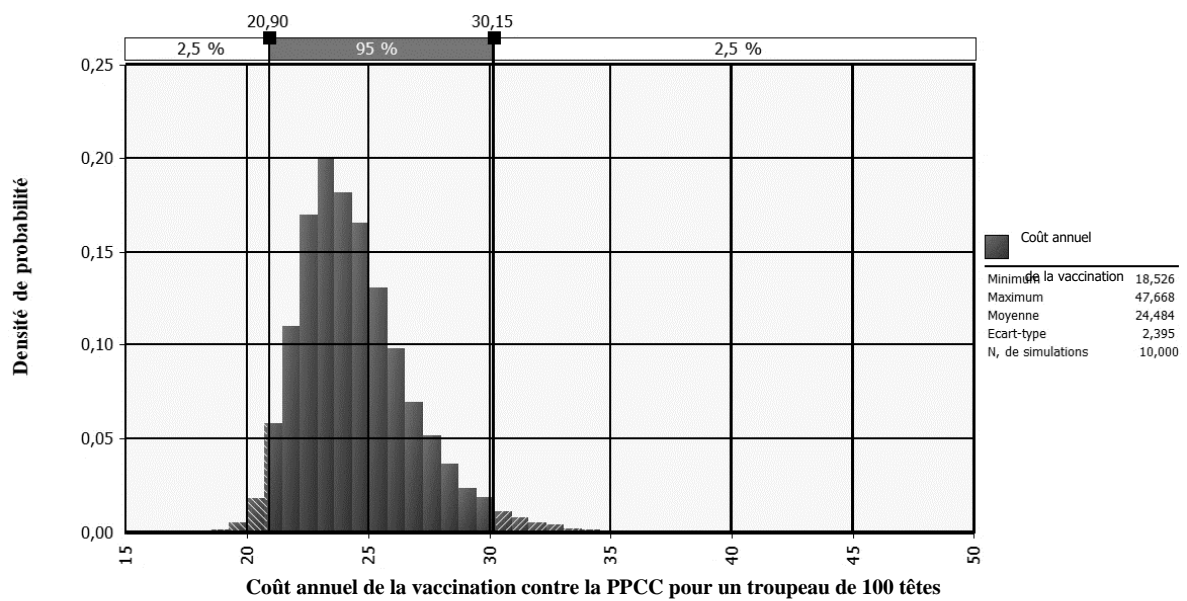
[B] Scénario 2 (50 % d'effectivité vaccinale)



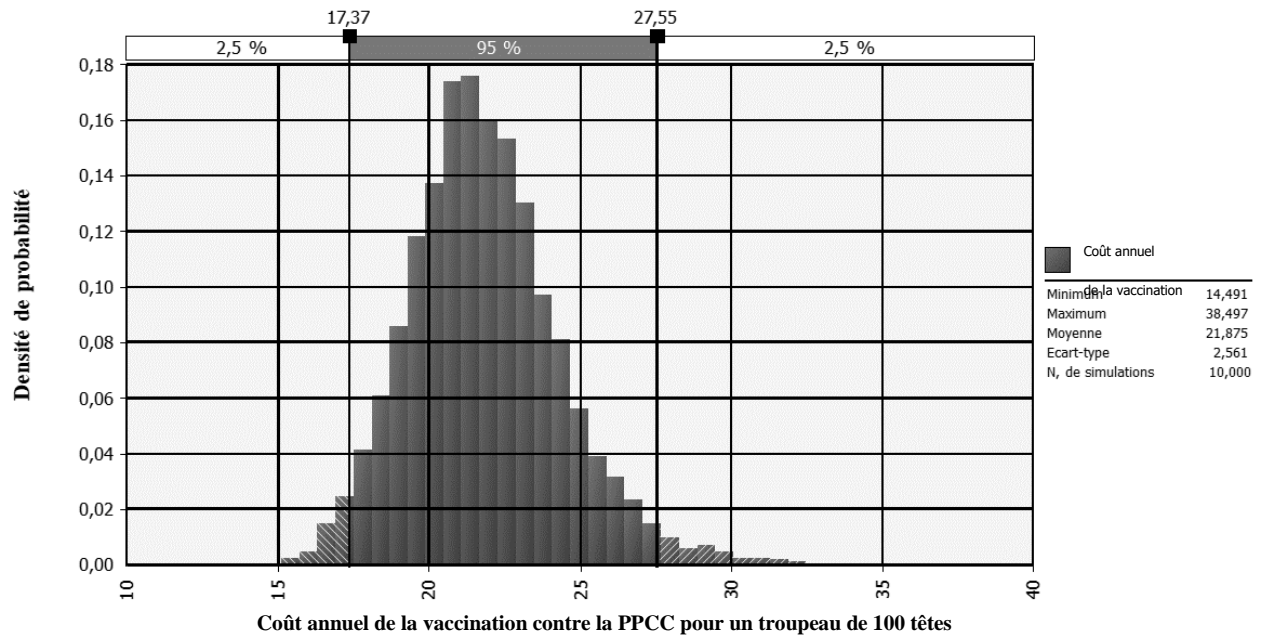
[C] Scénario 3 (20 % d'effectivité vaccinale)



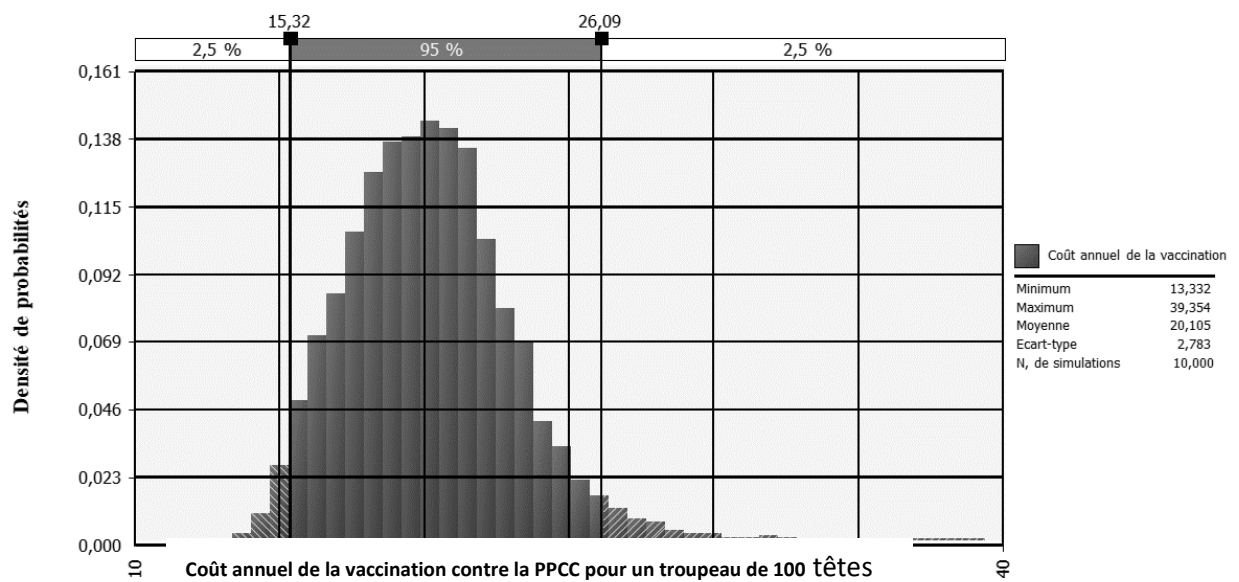
[D] Scénario 1 (95 % d'effectivité vaccinale)



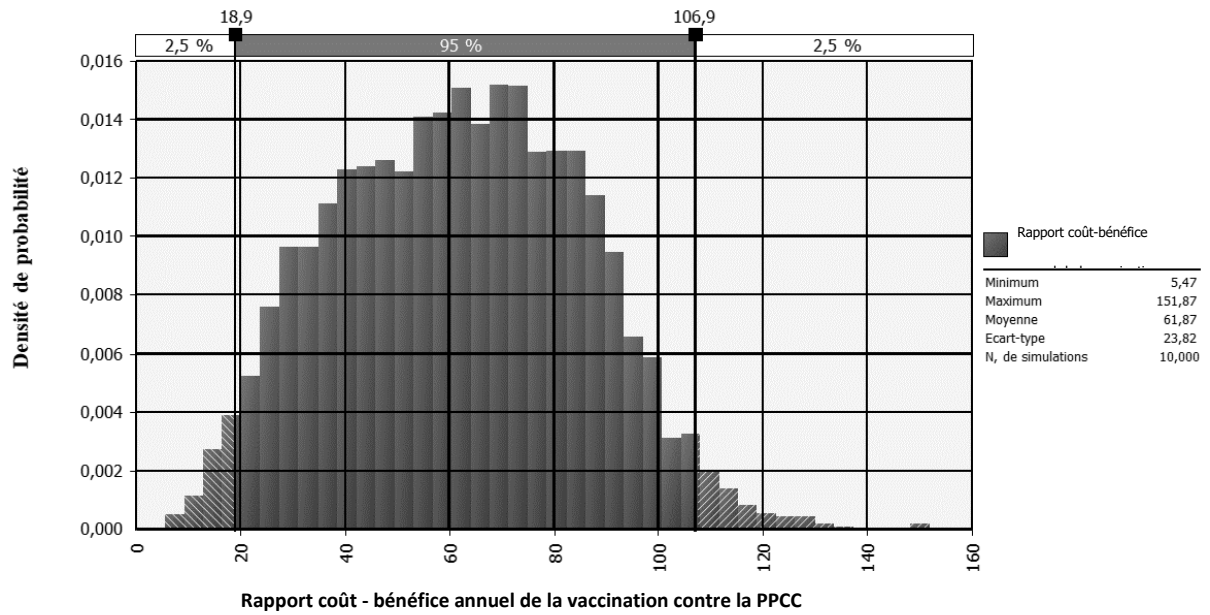
[E] Scénario 2 (50 % d'effectivité vaccinale)



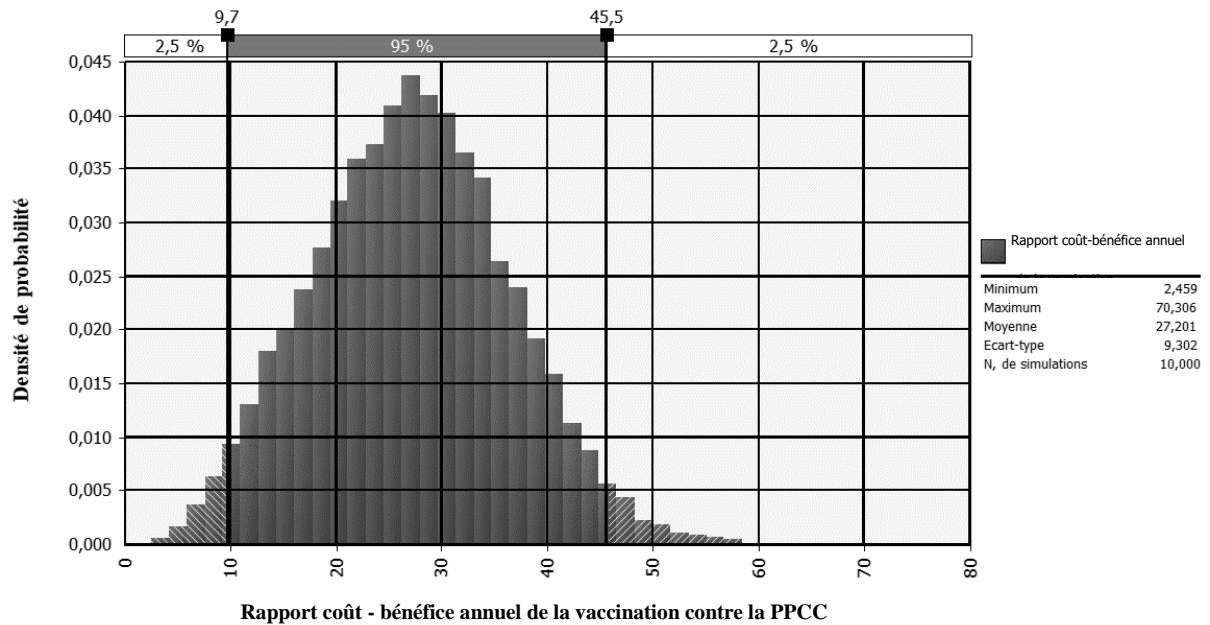
[F] Scénario 3 (20 % d'effectivité vaccinale)



[G] Scénario 1 (95 % d'effectivité vaccinale)



[H] Scénario 2 (50 % d'effectivité vaccinale)



[I] Scénario 3 (20 % d'effectivité vaccinale)

