

ÉTUDE DE RÉSEAUX DE CONTACTS ENTRE CHIENS DOMESTIQUES EN INDONÉSIE ET AU GUATEMALA A L'AIDE DE MÉTHODES D'ANALYSE DES RÉSEAUX SOCIAUX*

Warembourg Charlotte¹, Alvarez Danilo², Berger-González Monica^{2,3},
Alves De Sousa Filipe Maximiano¹, Wera Ewaldus⁴, Dürr Salome¹



RÉSUMÉ

L'Organisation mondiale de la santé animale (OIE), l'Organisation mondiale de la santé (OMS) et l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) ont pour objectif d'éradiquer la rage humaine d'origine canine d'ici 2030. Cependant, les stratégies actuelles de contrôle de la rage chez les chiens domestiques ne tiennent pas compte de la variabilité comportementale entre individus d'une même population ou de la variabilité entre populations de chiens d'origine différente. Notre objectif est d'étudier les réseaux de contacts entre chiens, ceux-ci pouvant influencer sur la transmission de maladies infectieuses et par voie de conséquence, sur les stratégies de contrôle à adopter. Cette étude porte sur les chiens appartenant à des propriétaires, mais ayant la possibilité de divaguer sans surveillance. Nous avons collecté des données dans deux pays : le Guatemala et l'Indonésie. Au total, 341 chiens ont été équipés de capteurs de contact géoréférencés. À l'aide de méthodes d'analyse des réseaux sociaux, nous avons pu mettre en évidence les différences et similitudes entre chiens d'une même zone (nombre de contacts, intermédiarité) et entre les réseaux de contacts de différentes zones (structure, regroupements).

Mots-clés : écologie, degré, intermédiarité, réseau de contacts, rage.

ABSTRACT

The World Health Organization (WHO), the World Organization for Animal Health (OIE) and the Food and Agriculture Organization (FAO) aim to globally eradicate canine-mediated human rabies by 2030. However, the current control programs do not consider the variability of behaviour between individual dogs and between dog populations. Our objective is to study dog contact networks. The structure of these networks might influence the spread of infectious diseases and therefore control programs. This study focuses on owned free-roaming domestic dogs. We collected data in two countries: Guatemala and Indonesia. A total of 341 dogs have been equipped with georeferenced contact sensors. Using network analysis, we highlighted the differences and similitudes between dogs living in the same area (degree, betweenness) and between dog contact networks from different origins (structure, clustering).

Keywords: Ecology, Degree, Betweenness, Contact network, Rabies.



Reçu le 30 juin 2019, accepté le 4 novembre 2019

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

¹ Veterinary Public Health Institute, Faculté Vetsuisse, Université de Berne, Schwarzenburgstrasse 161, 3097 Liebefeld, Suisse

² Universidad del Valle, Guatemala City, Guatemala

³ Swiss Tropical and Public Health Institute, Bâle, Suisse

⁴ Kupang State Agricultural Polytechnic (Politeknik Pertanian Negeri Kupang), Timor Oriental, Indonésie

INTRODUCTION

La rage est une maladie virale causée par un virus de la famille des *Rhabdoviridae* et du genre *Lyssavirus* [Warrell et Warrell, 2004]. Ce virus provoque une encéphalite mortelle après l'apparition des premiers symptômes dans la quasi-totalité des cas. On estime qu'environ 60 000 personnes décèdent de la rage chaque année dans le monde, dont la très grande majorité en Asie et en Afrique [Hampson *et al.*, 2015]. Dans 99 % des cas de rage chez l'Homme, le virus a été transmis par un chien [WHO, 2018]. L'Organisation mondiale de la santé animale (OIE), l'Organisation mondiale de la santé (OMS) et l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) ont fixé pour objectif d'éradiquer la rage humaine d'origine canine d'ici 2030. Pour atteindre cet objectif, ils préconisent la vaccination de masse avec une couverture vaccinale d'au moins 70 % pour éradiquer la rage dans une population de chiens donnée [Coleman et Dye, 1996 ; Cleaveland *et al.*, 2003].

Cependant, les mesures de contrôle ne prennent pas en compte la variabilité comportementale entre chiens ou entre populations de chiens (e.g. originaires de continents différents). Dans son rapport de consultation sur la rage, l'OMS déclare que les programmes de vaccination devraient tenir compte de l'écologie locale des populations canines et que la recherche devrait participer à l'élaboration de meilleurs protocoles de vaccination (e.g. étudier la possibilité de vacciner prioritairement les chiens à risque et donc réduire la couverture vaccinale nécessaire pour contrôler la circulation virale) [WHO, 2018]. Il existe encore peu d'études comparant l'écologie de chiens d'origine géographiques ou sociales différentes. La majorité des études se concentrent soit sur un aspect spécifique tel que la démographie [Morters *et al.*, 2014], soit sur une localisation géographique unique [Dürr *et al.*, 2017].

Les chiens sont des animaux sociaux qui, en interagissant, forment un système de relations sociales complexe [Wey *et al.*, 2008]. Grâce aux

technologies actuelles telles que le GPS (Système de Positionnement Mondial) ou aux systèmes de réseaux sans fils (e.g. capteurs de contacts), il est possible de reconstituer les réseaux de contacts d'animaux sauvages ou domestiques [Hamede *et al.*, 2009 ; Laager *et al.*, 2019]. L'analyse des réseaux sociaux s'intéresse à l'étude des liens existant entre des différents acteurs. En l'appliquant à des réseaux de contacts entre animaux, elle permet de comprendre la structure des réseaux, le rôle des différents acteurs (nœuds) et d'analyser leur importance dans la transmission de maladies infectieuses [Westgarth *et al.*, 2009].

Le Guatemala est un pays d'Amérique Latine partageant des frontières avec le Mexique au Nord, Belize au Nord-Est, le Honduras et El Salvador au Sud-Est. Il est bordé à l'Est par la Mer des Caraïbes et à l'Ouest par l'Océan Pacifique. Ce pays n'est pas indemne de rage. D'après le troisième rapport de consultation sur la rage de l'OMS, entre 2013 et 2016, deux cas de rage humaine d'origine canine ont été signalés [WHO, 2018]. À cause de la sous-déclaration, le nombre de cas réels est probablement plus élevé.

L'Indonésie est un pays d'Asie du Sud-Est composé de plus de 13 000 îles. La rage canine est arrivée sur l'île de Florès en 1997 à la suite de l'importation de trois chiens originaires de l'île de Sulawesi [Windiyarningsih *et al.*, 2004]. La maladie y est depuis enzootique et l'OMS estime qu'une centaine de cas sont signalés par an [WHO Regional Office for South-East Asia, 2013].

L'objectif de ce travail est d'étudier le comportement social des chiens à l'aide de méthodes d'analyse des réseaux sociaux. Nous allons comparer des réseaux de contacts entre populations de chiens originaires du Guatemala et d'Indonésie, d'une part, et comparer les positions des chiens dans chacun des réseaux de contacts, d'autre part.

I - MATÉRIEL ET MÉTHODES

1. ZONES D'ÉTUDE

L'étude a été réalisée dans le département de Petén au Guatemala et sur l'île de Florès, province des Petites Iles de la Sonde Orientale en Indonésie.

Le département de Petén est le plus grand du pays et abrite de nombreuses populations indigènes mayas. Une zone urbaine et une zone rurale ont été sélectionnées dans le cadre de cette étude : la ville de Poptún et le village de La Romana. La ville de

Poptún est le chef-lieu de la municipalité éponyme et possède environ 15 000 habitants. Le village de La Romana se situe à une trentaine de kilomètres de Poptún et possède environ 500 habitants dont la majorité appartiennent au groupe ethnique indigène Q'eqchi'.

L'île de Florès, au Sud-Est de l'Indonésie fait partie de la province des Petites îles de la Sonde Orientale. La plus grande ville de l'île, Maumere, compte environ 50 000 habitants et est le chef-lieu du « kabupaten » (équivalent du département) de Sikka. La zone semi-urbaine choisie se nomme Habi et est localisée dans la continuité de la ville de Maumere. La zone rurale correspond au village de Hepang qui se situe à une vingtaine de kilomètres au Sud-ouest de Maumere.

2. ÉCHANTILLONNAGE

L'étude a été réalisée entre mai et juin 2018 au Guatemala et de juillet à septembre 2018 en Indonésie. Elle se focalise sur les chiens errants, ayant un propriétaire et ayant la possibilité de divaguer pendant toute ou une partie de la journée ou de la nuit. Dans chacune des quatre zones sélectionnées, nous avons délimité une zone d'étude d'une surface d'un kilomètre carré. Nous avons inclus dans notre échantillon tous les chiens dont l'habitation du propriétaire se situe dans ces quatre zones d'étude. Les critères d'exclusion sont les chiots de moins de quatre mois, trop petits pour porter les colliers, les chiennes gestantes et les chiens malades pour leur éviter le stress lié à la manipulation. Le protocole de recherche a été révisé avec l'aide du Délégué à la protection des animaux de l'Université de Zürich. Nous avons obtenu l'approbation du Comité d'éthique « Utilisation et Protection Animale » de l'Université del Valle de Guatemala (I - 2018 (3)) et de celui de la Faculté Vétérinaire de l'Université Nusa Cendana de Kupang (No KEH/FKH/SK/2019/05/002).

3. COLLECTE DES DONNÉES

Les équipes étaient constituées de vétérinaires, d'un médecin et de techniciens en santé humaine et en santé animale au Guatemala. En Indonésie, l'équipe était constituée uniquement de vétérinaires et de techniciens en santé animale. La majorité des membres de l'équipe ont été recrutés localement.

Les objectifs et le protocole d'étude ont été présentés au propriétaire des chiens. Ceux-ci ont donné leur consentement éclairé en signant une fiche de consentement (Guatemala) ou par oral (Indonésie).

3.1 CAPTEURS DE CONTACT GÉO-RÉFÉRÉNCÉS

Chaque chien a été équipé d'un capteur de contact géo-référencé (CCG) monté sur un collier en nylon. Un CCG combine un système de localisation (GPS) et un capteur de contact fonctionnant par technologie ultra-haute fréquence. Cet équipement enregistre la position du chien (coordonnées GPS, date, heure et qualité du signal) ainsi que les identifiants d'autres capteurs de contacts situés à proximité (identifiant de l'autre capteur, date, heure et force du signal). Les chiens ont porté ces colliers pendant trois à cinq jours et les CCG ont enregistré les données toutes les minutes pour le GPS et toutes les trente secondes pour les capteurs de contact.

Les capteurs de contact, ainsi que l'application DogLogger, fonctionnant sur téléphone mobile muni du système d'exploitation mobile développé par Apple (iOS : iPhone Operating System), ont été développés par Bonsai Systems, une entreprise fondée par des chercheurs de l'École polytechnique fédérale de Zurich (ETH Zürich). L'application DogLogger permet de contrôler les CCG et de télécharger les données collectées.

3.2 QUESTIONNAIRES

Les propriétaires ont été interrogés par un membre de l'équipe parlant la langue locale. Les entretiens se sont déroulés en Espagnol ou en Q'eqchi' au Guatemala et en Bahasa en Indonésie. Les questions portaient sur le chien (e.g. sexe, âge, statut reproductif, historique des portées, dernière vaccination antirabique), le propriétaire (e.g. statut socio-économique, gestion du chien, déplacements avec l'animal) et l'environnement (e.g. possibilité de contact avec d'autres chiens ou des animaux sauvages, lieux de rassemblements entre chiens, température).

Les informations ont été entrées hors ligne sur une tablette numérique équipée de l'application KoBoCollect, qui permet d'entrer les informations collectées et d'y associer la location GPS de l'habitation ainsi que la photo du chien. Les données ont ensuite été envoyées sur une plateforme en ligne afin de faciliter l'accès et le partage des données.

4. ANALYSE STATISTIQUE

4.1 DESCRIPTION DE LA POPULATION D'ÉTUDE

Les données ont été téléchargées à partir de KoboCollect sous forme de tableaux Excel et analysées avec le logiciel R, ses extensions standards et les extensions dplyr et ggplot2. Le test du χ^2 et le test de Wilcoxon-Mann-Whitney ont été

utilisés pour comparer respectivement la répartition par sexe et la distribution des âges des chiens originaires du Guatemala et d'Indonésie.

4.2 ANALYSE DES RESEAUX DE CONTACTS

Le réseau de contacts entre chiens a été reconstitué pour chacune des quatre zones à partir des données collectées par les capteurs de contact pendant les deux premiers jours d'enregistrement. Les nœuds correspondent aux chiens inclus dans l'étude et les liens à l'enregistrement d'au moins un contact d'au moins une minute entre les deux chiens pendant les deux premiers jours d'enregistrement. Nous avons ainsi obtenu quatre réseaux de contacts non dirigés : Guatemala urbain, Guatemala rural, Indonésie semi-urbain et Indonésie rural.

Pour comparer entre eux les réseaux de contacts, nous avons calculé leur densité, la longueur géodésique moyenne, la longueur géodésique moyenne relative, le coefficient d'agrégation, la médiane et l'écart interquartile des degrés, la médiane et l'écart interquartile des degrés relatifs et l'indice « petits mondes ». La densité correspond au nombre de liens existants divisé par le nombre de liens possibles, c'est-à-dire le nombre de liens qui existeraient si tous les chiens du réseau étaient en contact. La distance géodésique correspond au nombre de liens sur le chemin le plus court entre deux nœuds. La distance géodésique moyenne correspond à la valeur moyenne de ces distances dans un réseau. La distance géodésique moyenne relative correspond à la distance géodésique moyenne divisée par le nombre de nœuds dans le réseau. Le coefficient d'agrégation mesure la probabilité que deux nœuds soient en contact s'ils ont

un voisin en commun. Le degré d'un chien correspond au nombre de chiens avec lesquels il est en contact. Le degré relatif correspond au degré divisé par le nombre de nœuds dans le réseau. Les mesures relatives ont été calculées afin de permettre la comparaison de réseaux possédant un nombre de nœuds différent. Un réseau de type « petits mondes » est un réseau possédant une distance géodésique moyenne faible et un coefficient d'agrégation élevé. L'indice « petits mondes » a été calculé selon la méthode développée par Humphries et Gurney [Humphries et Gurney, 2008]. Nous avons représenté la distribution des degrés relatifs sous forme de diagrammes en boîtes et la distribution cumulative des degrés sur une échelle log-log. Le test de Wilcoxon-Mann-Whitney a ensuite été utilisé pour comparer la distribution des degrés relatifs des quatre réseaux entre eux.

Nous avons utilisé le réseau semi-urbain d'Indonésie comme exemple pour comparer des chiens appartenant à un même réseau de contacts. Nous avons calculé le degré et l'intermédiarité de chaque chien. L'intermédiarité correspond au nombre de fois où un chien se situe sur le chemin le plus court entre deux chiens du réseau. Les chemins sont formés par les liens existants entre les chiens du réseau. Une classification hiérarchique fondée sur ces deux paramètres a été ensuite réalisée. Le dendrogramme obtenu a été coupé de manière à minimiser le chevauchement entre les plages de valeurs (degré et intermédiarité) des groupes ainsi formés. Ces groupes ont ensuite été comparés entre eux.

Les données ont été analysées avec le logiciel R, à l'aide des extensions `igraph`, `sna`, `fitdistrplus`, `lubridate`, `dplyr`, `qgraph` et `FactoMineR`.

II - RÉSULTATS

1. DESCRIPTION DES POPULATIONS DE CHIENS

Au total, 341 chiens ont été inclus dans l'étude dont 176 au Guatemala et 165 en Indonésie et 240 propriétaires ont été interrogés dont 128 au Guatemala et 112 en Indonésie. Chaque propriétaire possédait entre 1 et 13 chiens au Guatemala et entre 1 et 10 chiens en Indonésie, en incluant les chiots. Les raisons pour lesquelles certains chiens n'ont pas pu être inclus dans l'étude comprennent l'absence du propriétaire, le refus de participation, l'absence, l'agressivité et le stress du chien. Les raisons évoquées lors d'un refus de participation sont l'absence de carte d'identité nécessaire pour signer le formulaire de consentement, l'absence de la

personne capable de manipuler le chien, les croyances culturelles, l'hypothèse que le collier puisse gêner le chien lors de la chasse et la crainte que le CCG puisse être utilisé pour espionner les membres de la famille.

La structure de la population canine est similaire entre réseaux urbains/semi-urbains et ruraux d'un même pays mais les populations d'étude diffèrent entre l'Indonésie et le Guatemala. En Indonésie, la population d'étude est constituée de 63,6 % de femelles et 36,4 % de mâles alors qu'au Guatemala 38,9 % des animaux sont des femelles et 61,1 % des mâles. La différence de répartition de sexe est significative ($p=8,2.10^{-6}$).

La distribution des âges des chiens participant à l'étude au Guatemala et en Indonésie est visible sur la figure 1. La médiane est de 1 an (écart interquartile de 1,5 ans) pour l'Indonésie et de 2 ans (écart interquartile de 2 ans) au Guatemala. La différence de distribution d'âge est significative ($p=2.10^{-8}$).

Le statut du chien dans le foyer tel que perçu par le propriétaire est décrit dans le tableau 1 pour les deux pays.

Figure 1

Distribution des âges des chiens inclus dans l'étude dans le département de Petén au Guatemala et de Sikka en Indonésie

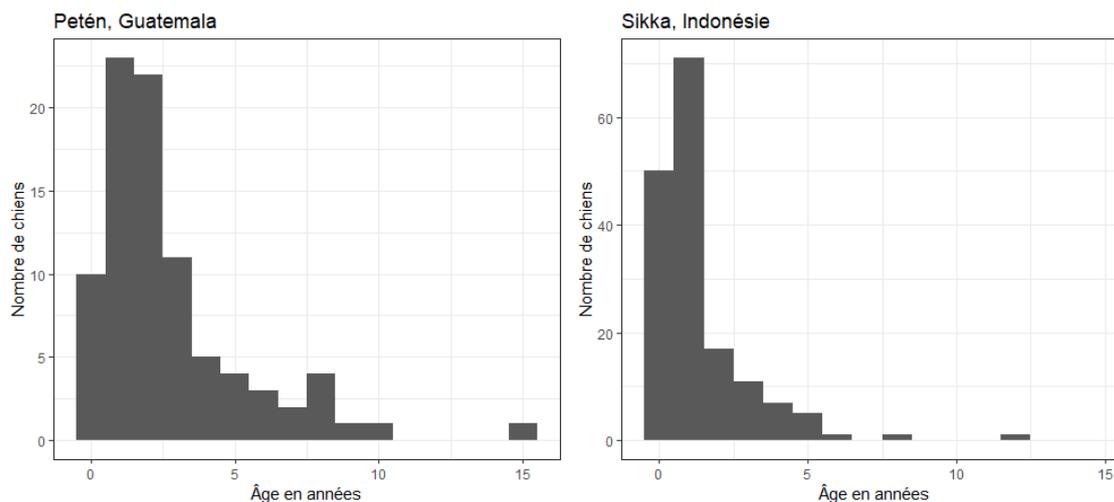


Tableau 1

Statut du chien dans le foyer tel que perçu par les propriétaires des chiens inclus dans l'étude au Guatemala et en Indonésie.

Un chien peut posséder plusieurs statuts.

	Guatemala (n=176)	Indonésie (n=165)
Chien de garde (%)	89,2	97,6
Chien de berger (%)	1,1	0,6
Chien de chasse (%)	17,6	-
Animal de compagnie (%)	46,6	24,8
Animal de production (%)	-	16,4

2. COMPARAISON DES DIFFÉRENTES POPULATIONS DE CHIENS

Les caractéristiques des quatre réseaux étudiés, Guatemala réseaux urbain et rural et Indonésie réseaux semi-urbain et rural, sont présentées dans le tableau 2, les diagrammes en boîtes représentant les degrés relatifs en figure 2 et la distribution cumulative des degrés représentés sur une échelle log-log en figure 3.

Les réseaux des chiens vivant en zone rurale sont plus denses que ceux des chiens vivant en zone urbaine/semi-urbaine. Les chiens vivant en zone rurale sont en moyenne en contact avec une proportion plus importante de chiens de leur réseau que ceux vivant en zone urbaine/semi-urbaine (Guatemala $p<2,2.10^{-16}$; Indonésie : $p=1,5.10^{-6}$).

En zone rurale, les chiens vivant au Guatemala sont en moyenne en contact avec une proportion plus

importante de chiens de leur réseau que ceux vivant en Indonésie ($p=0,0003$). En zone urbaine/semi-urbaine, les chiens vivant en Indonésie sont en moyenne en contact avec plus de chiens que ceux vivant au Guatemala ($p=0,0068$).

Les réseaux Guatemala urbain, Guatemala rural et Indonésie semi-urbain présentent les caractéristiques de réseaux de type « petits mondes ». Les distributions cumulatives des degrés des quatre réseaux étudiés sont hétérogènes et désaxées vers la droite.

Tableau 1
Caractéristiques des quatre réseaux étudiés :
Guatemala réseaux urbain et rural et Indonésie réseaux semi-urbain et rural

		Guatemala		Indonésie	
		Urbain	Rural	Semi-urbain	Rural
Nombre de chiens dans le réseau		101	54	77	55
Densité du réseau		0,04	0,15	0,06	0,12
Longueur géodésique moyenne		3,8	2,2	3,8	2,7
Longueur géodésique moyenne relative		0,04	0,04	0,05	0,04
Coefficient d'agrégation		0,22	0,38	0,51	0,49
Degré	Médiane	3	6	4	5
	Ecart interquartile	3	5	5	6
Degré relatif	Médiane	0,03	0,11	0,05	0,09
	Ecart interquartile	0,03	0,09	0,06	0,11
Indice "petits mondes"		4,72	1,60	2,08	0,71

Figure 2
Diagrammes en boîtes représentant les degrés relatifs des chiens
inclus dans les réseaux urbains/semi-urbains et ruraux en Indonésie et au Guatemala

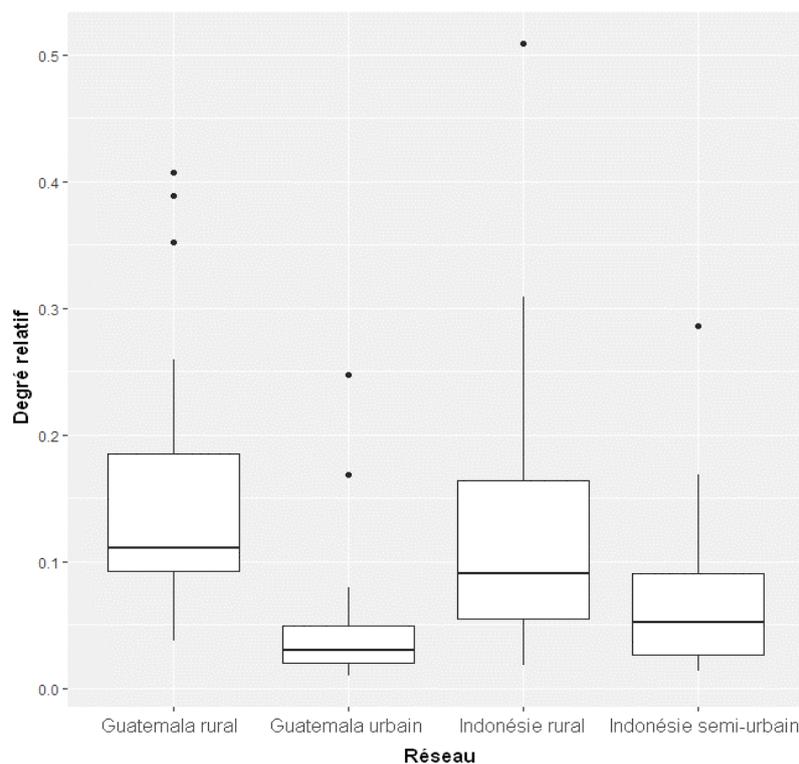
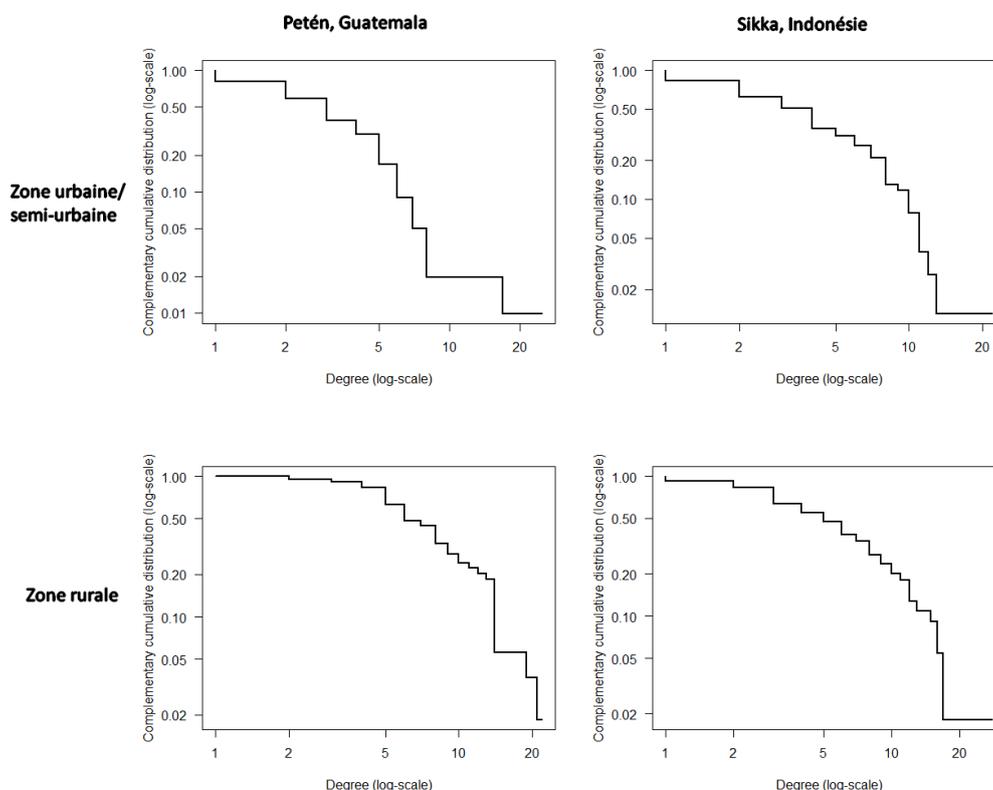


Figure 3

Distribution cumulative des degrés représentés sur une échelle log-log pour chaque réseau



3. COMPARAISON DE CHIENS APPARTENANT À UNE MÊME POPULATION

Le dendrogramme résultant de la classification hiérarchique est présenté en figure 4 et a été divisé au niveau de la barre horizontale. Cinq groupes ont ainsi été définis et sont représentés sur le réseau de contacts étudié (Indonésie, réseau semi-urbain) en figure 5. Les caractéristiques de chacun de ces groupes sont décrites dans le tableau 3.

Le chien appartenant à la catégorie 1 se démarque des autres chiens du réseau par un degré et une

intermédiarité très élevés comparés à ceux des autres chiens du réseau de contacts. Les chiens des catégories 2, 3 et 4 ont tous été en contact avec au minimum quatre autres chiens pendant les deux jours de la période d'étude et ont une intermédiarité faible à moyenne.

Les chiens possédant un degré et une intermédiarité faibles (catégorie 5) représentent 64 % des chiens du réseau.

Tableau 2

Caractéristiques des catégories formées par classification hiérarchique pour le réseau semi-urbain d'Indonésie

	Nombre de chiens	Degré Moyenne (min-max)	Intermédiarité Moyenne (min-max)
Catégorie 1	1	22	1 865
Catégorie 2	6	7,5 (4-10)	435,4 (364,5-500,4)
Catégorie 3	7	11,1 (10-13)	117,5 (13,6-250,3)
Catégorie 4	14	6,6 (5-8)	51,6 (0,3-204,3)
Catégorie 5	49	2,4 (1-4)	38,6 (0-280)

Figure 4
Dendrogramme obtenu par classification hiérarchique des degrés et intermédiarités des chiens du réseau semi-urbain en Indonésie

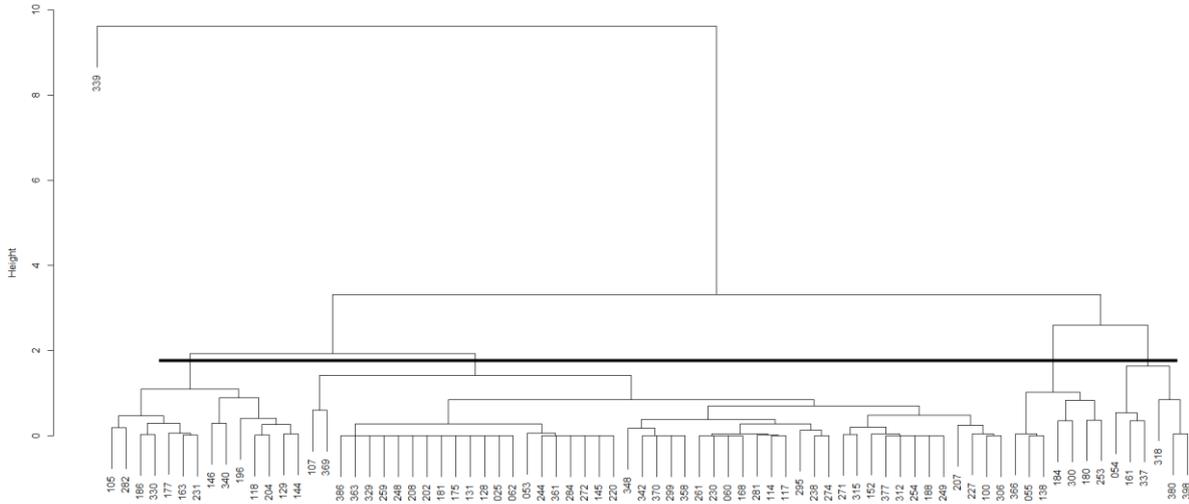
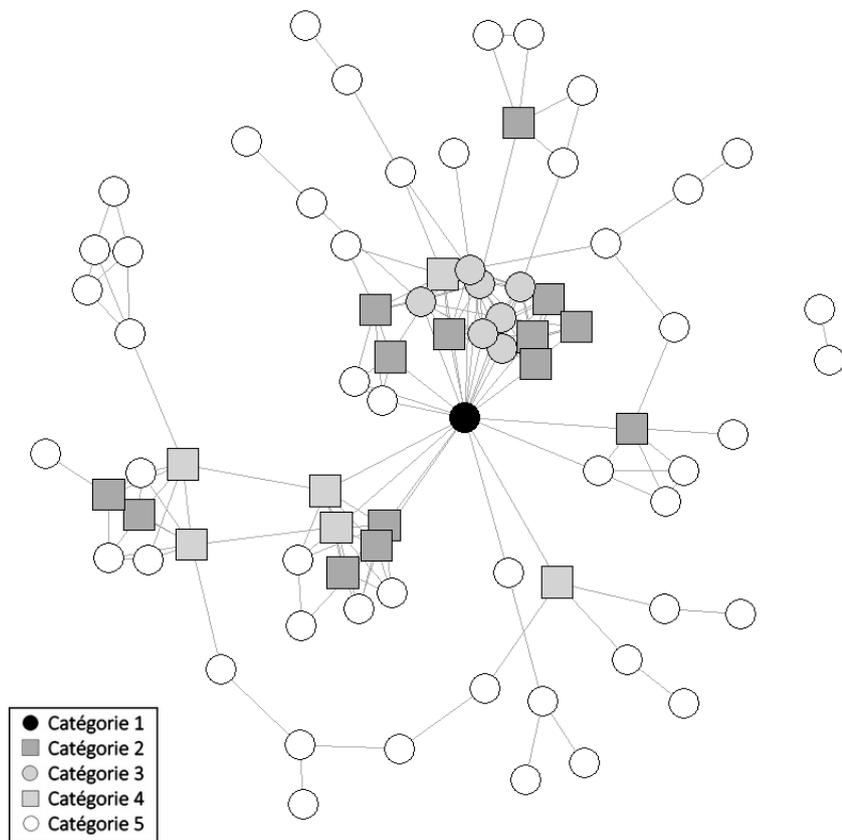


Figure 5
Groupes identifiés par classification hiérarchique dans le réseau semi-urbain en Indonésie



III - DISCUSSION

Dans ce travail, nous avons étudié les réseaux de contacts en zone urbaine/semi-urbaine et rurale de deux pays. Dans ces réseaux, les chiens vivant en zone rurale semblent plus connectés entre eux que les chiens vivant en zone urbaine/semi-urbaine. Parmi des chiens appartenant à une même population, plus de 60 % des chiens étudiés ont un degré et une intermédiarité faibles.

Un chien qui possède un degré élevé est, par définition, en contact avec un nombre élevé d'autres chiens. Si une maladie infectieuse se propage dans le réseau de contacts et qu'un chien possédant un degré élevé est infecté, il risque de transmettre l'agent pathogène à un nombre élevé d'individus et d'accélérer la propagation de la maladie [Wey *et al.*, 2008]. De même, les chiens possédant une intermédiarité élevée sont souvent des individus qui relient des sous-communautés de chiens dans le réseau. Si ces chiens viennent à s'infecter, ils risquent d'accélérer la propagation de la maladie en infectant de nouvelles sous-communautés [Wey *et al.*, 2008]. Il serait donc intéressant pour les programmes de contrôle (e.g. campagnes de vaccination antirabique) de cibler en priorité les chiens possédant un degré et une intermédiarité élevés, en particulier si ces chiens ne représentent qu'une faible proportion de la population. Il serait intéressant de modéliser l'effet d'une stratégie de vaccination ciblée sur les chiens à degré et intermédiarité élevés sur la transmission de maladies telles que la rage dans ces réseaux de contacts.

En comparant les réseaux, nous avons pu mettre en évidence que trois des réseaux présentaient les caractéristiques de réseaux dits « petits mondes ». Le quatrième réseau (i.e. Indonésie rural) possède un coefficient d'agrégation élevé mais une longueur géodésique moyenne plus importante que celle d'un réseau aléatoire possédant le même nombre de nœuds et de liens. Ceci pourrait s'expliquer par la topographie de la zone d'étude. Hepang est une zone vallonnée avec 100m de dénivelé entre le point le plus haut et le point le plus bas de la zone. Il est fortement probable que la distance moyenne géodésique soit longue parce que les chiens, regroupés localement, ne s'aventurent pas dans les pentes trop raides et soient en contact de proche en proche, le long des routes par exemple. Les réseaux de type « petits mondes » sont des réseaux dans lesquels les agents infectieux se propagent plus rapidement que dans les réseaux aléatoires [Watts et Strogatz, 1998 ; Christley et French, 2010]. Bien que les réseaux étudiés ne semblent pas présenter les caractéristiques de réseaux libres d'échelle, la taille des réseaux étudiés est trop faible pour conclure. Les distributions cumulatives des degrés des quatre

réseaux étudiés présentent tout de même les caractéristiques de réseaux à fort potentiel de transmission, bien que moins important que celui des réseaux libres d'échelle.

D'après la comparaison de la distribution des degrés relatifs, les chiens vivant en zone rurale sont en contact avec une proportion plus élevée de chiens de leur réseau que ceux vivant en zone urbaine/semi-urbaine. Cependant, dans les zones rurales sélectionnées, la zone d'étude de 1km² englobe la totalité du village alors que ce n'est pas le cas dans les zones urbaines/semi-urbaines sélectionnées. Le degré des chiens vivant aux limites de la zone d'étude a donc pu être sous-estimé car ces chiens ont probablement été en contact avec des chiens venant de l'extérieur de la zone. Selon une étude portant sur des chiens domestiques errants en Australie, la taille moyenne du domaine vital d'un chien est de 6,79 hectares [Dürr *et al.*, 2017]. Ceci correspond à un cercle d'environ 150m de rayon. En supposant que le domaine vital d'un chien soit un cercle centré sur l'habitation du propriétaire, les chiens dont le propriétaire vit à moins de 150m de la limite de la zone ont pu être en contact avec d'autres chiens non-équipés de colliers. Nous avons exclu, dans les deux zones urbaines, tous les chiens dont le propriétaire vit à moins de 150m des limites de la zone d'étude. Nous avons utilisé un test de Wilcoxon-Mann-Whitney pour comparer, à nouveau, la distribution des degrés relatifs des réseaux urbain/semi-urbain et ruraux. La différence reste significative dans les deux pays. Nous pouvons en conclure que nos résultats n'ont pas été compromis par cette limite. Dans notre échantillon, les chiens en zone rurale sont bien en contact avec une proportion plus élevée de chiens de leur réseau que les chiens vivant en zone urbaine/semi-urbaine.

Nous avons observé des différences entre les réseaux de chiens originaires du Guatemala et d'Indonésie ; cependant, il n'est pas possible de tirer de conclusions sur les raisons sous-jacentes. Cela pourrait s'expliquer par les différences entre nos populations d'étude (différence entre les deux pays) ou par le choix de la dichotomie entre zone urbaine/semi-urbaine et rurale. Les chiens originaires du Guatemala présentent une majorité de mâles et sont en moyenne plus âgés que les chiens originaires d'Indonésie qui sont majoritairement des femelles plus jeunes. Ces différences peuvent s'expliquer par la consommation de viande canine sur certaines îles d'Indonésie dont l'île de Florès. Ceci a pu être mis en évidence par nos données (tableau 1) et a déjà été reporté dans la littérature [Wera *et al.*, 2015]. Bien que faisant partie d'un pays majoritairement musulman (la religion musulmane

interdit la consommation de viande de chien, animal considéré comme impur), la majorité des habitants de Florès sont catholiques. La viande de chien y est prisée, particulièrement lors des cérémonies religieuses [Wera *et al.*, 2015]. Les propriétaires ont donc tout intérêt à garder les femelles pour la reproduction. Ces différences ont pu influencer le comportement social des chiens [Dürr *et al.*, 2017] et ainsi rendre la comparaison de ces populations plus complexe. Le choix de la dichotomie entre zone urbaine/semi-urbaine et zone rurale a également pu influencer ces résultats. Une zone urbaine, respectivement rurale, au Guatemala diffère d'une zone semi-urbaine, respectivement rurale, en Indonésie et il n'est peut-être pas raisonnable de les comparer. De même, ceci pourrait expliquer pourquoi la différence entre les médianes des degrés relatifs est plus importante entre le réseau rural et urbain au Guatemala qu'en Indonésie. Au Guatemala, la zone urbaine diffère plus de la zone rurale (distribution des routes, densité de population) qu'en Indonésie (présence de zones de friches ou de champs dans les deux zones). Pour pallier cette limite, il serait intéressant de comparer d'autres facteurs pouvant avoir un impact sur le comportement des chiens, par exemple les densités humaines et canines dans les zones urbaines/semi-urbaines et rurales étudiées.

Le virus de la rage est connu pour modifier le comportement des animaux infectés et notre étude a été réalisée sur des chiens indemnes de rage. Cependant, l'impact de l'infection par le virus de la rage sur le comportement social des chiens est peu connu. Une étude portant sur la rage chez les rats-laveurs a montré que les rats-laveurs enrégés parcouraient de plus grandes distances que les rats-laveurs sains [Roscoe *et al.*, 1998]. Brookes *et al.* [2019] ont modélisé l'impact de paramètres liés aux modifications comportementales (i.e. augmentation de la probabilité de morsure, augmentation de la durée des contacts et restructuration du réseau), sur le déclenchement d'une épizootie de rage canine dans un réseau de contacts, sa durée, le nombre de chiens infectés et le taux de reproduction effectif. Ils n'ont pas pu montrer l'importance de la restructuration du réseau (i.e. disparition de liens existants et apparition de nouveaux liens) dans le cas d'épizooties de rage dans des populations canines de petite taille. Cependant, ils émettent l'hypothèse que ces modifications structurelles pourraient influencer la transmission de la rage dans des populations canines de taille plus importante. Il est possible que le réseau de contacts d'un chien enrégé soit impacté et que le nombre de contacts soit modifié, mais nous ne pouvons pas présumer dans quelle mesure.

Deux autres limitations de cette étude sont la durée de collecte des données et l'exhaustivité des réseaux.

Les mouvements et contacts des chiens ont été enregistrés pendant trois à cinq jours car nous étions limités par la capacité de la batterie. Avoir un intervalle d'enregistrement d'une minute, permet d'obtenir des données précises mais consomme rapidement la batterie, dont la taille et le poids sont limités par ceux du dispositif (appareil et collier). Pour l'exhaustivité du réseau de contacts, il est essentiel dans l'analyse des réseaux sociaux que les réseaux soient le plus complet possible afin de capturer la structure complète du réseau. Cependant, il n'a pas été possible d'équiper tous les chiens de la zone d'étude pour des raisons variées telles que l'absence du propriétaire ou du chien au moment des visites, le stress ou l'agressivité du chien, l'impossibilité de capture ou le refus du propriétaire de participer à l'étude. Des transects ont été réalisés dans les zones d'étude matin et soir pendant les deux jours suivant la mise en place des colliers. Pendant chaque transect, le nombre de chiens portant un collier avec CCG et le nombre de chiens n'en portant pas ont été comptabilisés. Ces données ont ensuite été analysées à l'aide d'un modèle statistique Bayésien de capture-recapture. Ce modèle applique différentes probabilités de capture aux différentes catégories de chiens (chiens avec ou sans propriétaires). Par exemple, un chien ayant un propriétaire peut être confiné à l'intérieur de la maison lors des transects. Ce n'est pas le cas d'un chien n'ayant pas de propriétaire. Les données sur les probabilités de confinement et la proportion de chiens sans propriétaires dans la zone d'étude ont été collectées lors de l'entretien avec les propriétaires et ont été utilisées comme prior dans le modèle. Nous estimons avoir réussi à atteindre dans la zone rurale au Guatemala et la zone semi-urbaine en Indonésie, plus de 75 % de la population de chiens vivant dans ces zones (données non publiées). Les proportions des deux autres réseaux varient entre 20 % et 57 %. Le nombre de chiens inclus dans cette l'étude est nettement plus élevé que dans la majorité des études précédentes impliquant l'utilisation de colliers GPS et de capteurs de contacts sur des chiens ayant la possibilité de se déplacer sans supervision [Dürr *et al.*, 2017 ; Laager *et al.*, 2018 ; Molloy *et al.*, 2017 ; Hudson *et al.*, 2017 ; Bombara *et al.*, 2017 ; Brookes *et al.*, 2018].

Comme décrit précédemment, il serait intéressant pour le contrôle des maladies infectieuses de cibler les chiens présentant un degré et une intermédiarité élevés. Identifier ces chiens et les cibler pourrait permettre d'améliorer le rapport coût-efficacité des stratégies de contrôle telles que les campagnes de vaccination antirabique. À cette fin, il est nécessaire de pouvoir identifier les chiens concernés, autrement qu'en les équipant d'un CCG. Dans cette optique, nous souhaitons, par la suite, identifier les facteurs expliquant la structure du réseau et les facteurs associés au fait de présenter un degré et/ou une

intermédiarité élevé(s) en utilisant des méthodes telles que la procédure de régression multiple quadratique et les modèles de régression linéaires fondés sur les permutations. L'avantage de ces méthodes est qu'elles permettent d'identifier de

potentielles relations entre variables, tout en prenant en compte la structure du réseau de contacts et par conséquent les dépendances entre les chiens du réseau.

IV - CONCLUSION

L'utilisation de capteurs de contact géoréférencés associée à l'analyse des réseaux de contacts entre chiens a permis de mettre en évidence les différences et similitudes entre populations de chiens différentes et entre chiens provenant d'un même réseau de

contacts. Il serait intéressant, surtout dans les pays à faible revenu, de proposer la mise en œuvre de stratégies de contrôle plus ciblées en se focalisant sur les chiens ayant une place prépondérante dans le réseau de contacts.

BIBLIOGRAPHIE

- Bombara C., Dürr S., Gongora J., Ward M.P. - Roaming of Dogs in Remote Indigenous Communities in Northern Australia and Potential Interaction between Community and Wild Dogs. *Aus. Vet. J.*, 2017, **95**(6), 182-88.
- Brookes V.J., VanderWaal K., Ward M.P. - The Social Networks of Free-Roaming Domestic Dogs in Island Communities in the Torres Strait, Australia. *Prev. Vet. Med.*, 2018 (en cours d'impression).
- Brookes V.J., Dürr S., Ward M.P. - Rabies-Induced Behavioural Changes Are Key to Rabies Persistence in Dog Populations: Investigation Using a Network-Based Model. *Plos. Neg. Trop. D.*, 2019 (pré-impression).
- Christley R.M., French N.P. - Small-World Topology of UK Racing: The Potential for Rapid Spread of Infectious Agents. *Equine Vet. J.*, 2010, **35**(6), 586-589.
- Cleaveland S., Kaare M., Tiringa P., Mlengeya T., Barrat J. - A Dog Rabies Vaccination Campaign in Rural Africa: Impact on the Incidence of Dog Rabies and Human Dog-Bite Injuries. *Vaccine*, 2003, **21**(17-18), 1965-1973.
- Coleman P.G., Dye C. - Immunization Coverage Required to Prevent Outbreaks of Dog Rabies. *Vaccine*, 1996, **14**(3), 185-186.
- Dürr S., Dhand N.K., Bombara C., Molloy S., Ward M.P. - What Influences the Home Range Size of Free-Roaming Domestic Dogs? *Epidemiol. Infect.*, 2017, **145**(7), 1339-1350.
- Hamede R.K., Bashford J., McCallum H., Jones M. - Contact Networks in a Wild Tasmanian Devil (*Sarcophilus Harrisii*) Population: Using Social Network Analysis to Reveal Seasonal Variability in Social Behaviour and Its Implications for Transmission of Devil Facial Tumour Disease. *Ecol. Lett.*, 2009, **12**(11), 1147-1157.
- Hampson K., Coudeville L., Lembo T., Sambo M., Kieffer A., Atlan M., Barrat J. *et al.* - Estimating the Global Burden of Endemic Canine Rabies. *Plos. Negl. Trop. D.*, 2015, **9**(4), 1-20.
- Hudson E.G., Brookes V.J., Dürr S., Ward M.P. - Domestic Dog Roaming Patterns in Remote Northern Australian Indigenous Communities and Implications for Disease Modelling. *Prev. Vet. Med.*, 2017, **146**, 52-60.
- Humphries M.D., Gurney K. - Network 'Small-World-Ness': A Quantitative Method for Determining Canonical Network Equivalence. *PLoS ONE*, 2008, **3**(4), e0002051.
- Laager M., Léchenne M., Naissengar K., Mindekem R., Ouissiguere A., Zinsstag J., Chitnis N. - A Metapopulation Model of Dog Rabies Transmission in N'Djamena, Chad. *J. Theor. Biol.*, 2019, **462**, 408-417.

- Laager M., Mbilo C., Madaye E.A., Naminou A., Léchenne M., Tschopp A., Naïssengar S.K., Smieszek T., Zinsstag J., Chitnis N. - The Importance of Dog Population Contact Network Structures in Rabies Transmission. *PLoS Negl. Trop. D.*, 2018, **12**(8), 1-18.
- Molloy S., Burleigh A., Dürr S., Ward M.P. - Roaming Behaviour of Dogs in Four Remote Aboriginal Communities in the Northern Territory, Australia: Preliminary Investigations. *Aus. Vet. J.*, 2017, **95**(3), 55-63.
- Morters M.K., Mckinley T.J., Restif O., Conlan A.J.K., Cleaveland S., Hampson K., Whay H.R., Damriyasa I.M., Wood J.L.N. - The Demography of Free-Roaming Dog Populations and Applications to Disease and Population Control. *J. App. Ecol.*, 2014, **51**(4), 1096-1106.
- Roscoe D.E., Holste W.C., Sorhage F.E., Campbell C., Niezgodna M., Buchannan R., Diehl D., Niu H.S., Rupprecht C.E. - Efficacy of an Oral Vaccinia-Rabies Glycoprotein Recombinant Vaccine in Controlling Epidemic Raccoon Rabies in New Jersey. *J. Wildlife Dis.*, 1998, **34**(4), 752-763.
- Warrell M.J., Warrell D.A. - Rabies and Other Lyssavirus Diseases. *Lancet*, 2004, **363**, 959-969.
- Watts D. et Strogatz S. - Collective Dynamics of Networks. *Nature*, 1998, **393**(6684), 440-442.
- Wera E., Mourits M.C.M., Hogeveen H. 2015. - Uptake of Rabies Control Measures by Dog Owners in Flores Island, Indonesia. *PLoS Negl. Trop. D.*, 2015, **9**(3), 1-23.
- Westgarth C., Gaskell R.M, Pinchbeck G.L., Bradshaw J.W.S., Dawson S., Christley R.M. - Walking the Dog: Exploration of the Contact Networks between Dogs in a Community. *Epidemiol. Infect.*, 2009, **137**(8), 1169-1178.
- Wey T., Blumstein D.T., Shen W., Jordán F. - Social Network Analysis of Animal Behaviour: A Promising Tool for the Study of Sociality. *Anim. Beha.*, 2008, **75**(2), 333-344.
- Windiyarningsih C., Wilde H., Meslin F.X., Suroso T., Widarso H.S. - The rabies epidemic on Flores Island, Indonesia (1998-2003). *J. Med. Assoc. Thailand*, 2004, **87**(11), 1389-1393.
- World Health Organization - WHO Third Expert Consultation on Rabies. World Health Organization. Technical Report Series, 2018, 195 pages.
- World Health Organization, Regional Office for South-East Asia - Rabies in the South-East Asia Region, 2013, 12 pages.

