



HAL
open science

Introduction de "Analyse des réseaux sociaux appliquée à l'éthologie et l'écologie"

Cédric Sueur

► **To cite this version:**

Cédric Sueur. Introduction de "Analyse des réseaux sociaux appliquée à l'éthologie et l'écologie". Analyse des réseaux sociaux appliquée à l'éthologie et l'écologie, Unpublished, 2015, Modélisations, simulations, systèmes complexes, 978-2-919694-97-6. 10.13140/RG.2.1.1511.8885 . hal-04797007

HAL Id: hal-04797007

<https://hal.science/hal-04797007v1>

Submitted on 21 Nov 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Chapitre 1 : Introduction

Cédric Sueur

Si vous venez à entendre le terme « réseaux sociaux », vous penserez probablement à Facebook, Twitter, Youtube ou même ResearchGate et Academia, pour n'en citer que quelques-uns. Avec le progrès informatique, les réseaux sociaux sont devenus un moyen de communication autonome et libre mais également un nouveau moyen pour les entreprises ou politiciens d'influencer nos décisions (Cross and Parker 2004; Sueur 2011). En effet, la plupart des informations que nous recevons en tant que décideurs viennent directement de notre réseau proche, notre famille, nos collègues de travail, et non pas de bases de données ou de rapports. Notre réseau social, nos connaissances, forment la première source d'information que nous utilisons pour prendre des décisions. A une époque où internet n'existait pas encore, Allen (1984) montra que des employés cherchant une information ont cinq fois plus de probabilités d'aller voir un collègue que d'aller chercher dans une base de données ou des documents.

Le partage d'information entre individus de la même espèce (Danchin et al. 2004) est l'une des hypothèses de la vie en groupe chez les animaux (Krause and Ruxton 2002). De la même manière que les humains, les animaux interagissent et communiquent quant aux sites de nourriture ou pour la reproduction. La façon dont ces animaux interagissent a une structure de réseau social qu'ils forment, réseau plus ou moins dense, centralisée ou modulaire. Cette structure, à son tour, peut influencer indirectement la valeur sélective, survie et reproduction, des membres du groupe ou de la population à travers par exemple la transmission des maladies (MacIntosh et al. 2011; Griffin and Nunn 2012) ou de l'information (Battesti et al. 2012; Barrett et al. 2012; Sueur et al. 2014), la coopération (Axelrod and Hamilton 1981; Boyd and Richerson 1992; Nowak 2006) ou les patterns de dispersion (Melnick and Kidd 1983; Lefebvre et al. 2003).

De nombreuses espèces animales vivent en groupe, ce qui leur apporte divers avantages en comparaison avec une vie solitaire, tels qu'une diminution des risques de prédation, une meilleure protection des ressources alimentaires et un partage de l'information conduisant à une meilleure exploitation du milieu (Hamilton 1971; Alexander 1974; Wrangham 1980). Inversement, la vie en groupe augmente la compétition entre congénères quand les ressources alimentaires sont limitées dans l'espace ou le temps (Janson and Goldsmith 1995), et elle est susceptible de favoriser la transmission des pathogènes de par des contacts plus fréquents ou une plus grande proximité entre les membres du groupe (Nunn et al. 2006; Huffman and Chapman 2009; Chapman et al. 2012). De plus, la vie en groupe peut être difficile à maintenir quand les différences entre individus en termes de besoins physiologiques et nutritionnels deviennent trop importantes (Krause and Ruxton 2002; Sueur et al. 2010; Sueur 2012). Dans ces conditions, les membres du groupe doivent faire un compromis (Petit and Bon 2010; King and Sueur 2011) entre les avantages et les inconvénients de la vie en groupe.

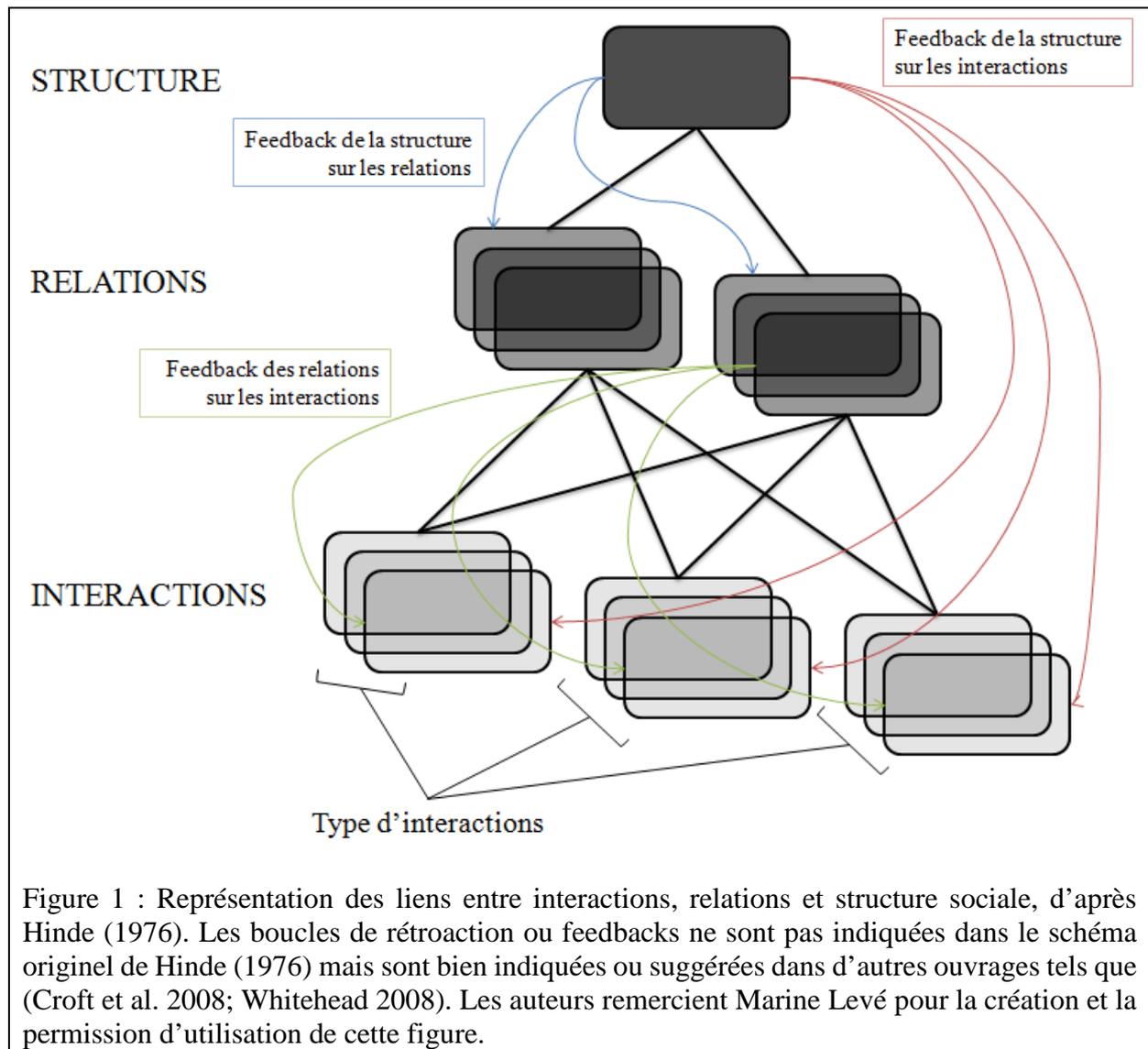
Les compromis associés à la vie en groupe peuvent émerger au niveau de l'individu, du groupe social ou de la population. Les coûts et bénéfices liés à ces compromis peuvent être identifiés et compris en étudiant les différents niveaux d'organisation sociale. Espinas avait mis en avant dès 1878 le rôle des interactions des membres d'un groupe dans la vie quotidienne dans son ouvrage *Des Sociétés Animales*. Cependant, il faudra attendre près d'un siècle pour que Hinde (1976), à la suite de Lévi-Strauss (1958), établisse une distinction claire entre interactions, relations et structures sociales. Hinde définit les interactions sociales comme les comportements par lesquels les individus agissent et s'influencent les uns les autres. Ces interactions sont de différents types (agression, affiliation, coopération, communication, etc.) et de fréquence et de durée variables. La relation sociale quant à elle représente la succession des interactions survenant entre deux partenaires qui se connaissent, ce qui implique que les interactions passées ont des conséquences sur les interactions futures dans une dyade d'individus donnés. Enfin, la

structure sociale résulte de l'ensemble des relations des membres du groupe, c'est donc le réseau des relations sociales (figure 1). L'étude de la structure sociale nécessite que l'identification des animaux du groupe ou de la population par l'observateur soit possible, et que ce dernier soit capable d'identifier les comportements de l'espèce. Il est important de considérer que le réseau social n'est pas juste une somme des relations sociales mais que la distribution de ces relations entre les membres du groupe a également une influence sur les relations elles-mêmes et sur les interactions, telle une boucle de rétroaction (Hinde, 1976). Il n'est pas nécessaire que l'animal ait une perception abstraite, mentale du réseau social de son groupe pour que ce réseau ait une influence sur la survie, la reproduction ou les comportements de cet individu. Ceci n'a d'ailleurs été démontré que chez les humains, voire les chimpanzés (Waal 2007). La structure d'un réseau va déterminer par exemple la probabilité d'un individu d'être infecté par un pathogène selon sa position dans ce réseau, et peu importe sa perception du réseau (Christley et al. 2005; Bull et al. 2012).

L'interaction sociale est un événement qui survient dans le monde physique. Au contraire, la relation sociale et la structure sociale sont des niveaux d'organisation qui sont déduits et non observés (Thierry 1994). Deux partenaires n'ont nul besoin d'être conscients de la relation qui les unit, il suffit qu'ils soient capables de se reconnaître et de mémoriser leurs interactions passées pour se trouver liés par une relation sociale (Hinde 1976). C'est probablement ce qui se rencontre chez une majorité d'animaux. Il est cependant nécessaire d'ajouter que l'on a pu montrer que certains primates sont capables de former des représentations mentales à propos de leurs relations sociales : ils peuvent distinguer si deux partenaires sont apparentés ou bien si l'un domine l'autre (Dasser 1988 ; Bovet & Washburn 2003). La structure sociale ou réseau social constitue également un concept abstrait. Il est difficile aujourd'hui encore de savoir si certaines espèces animales disposent des facultés cognitives nécessaires pour concevoir un réseau social (Thierry 1994). Il n'est toutefois pas impossible que des animaux comme les

chimpanzés soient capables de se représenter leur hiérarchie ou bien même toute leur communauté (Waal 2007).

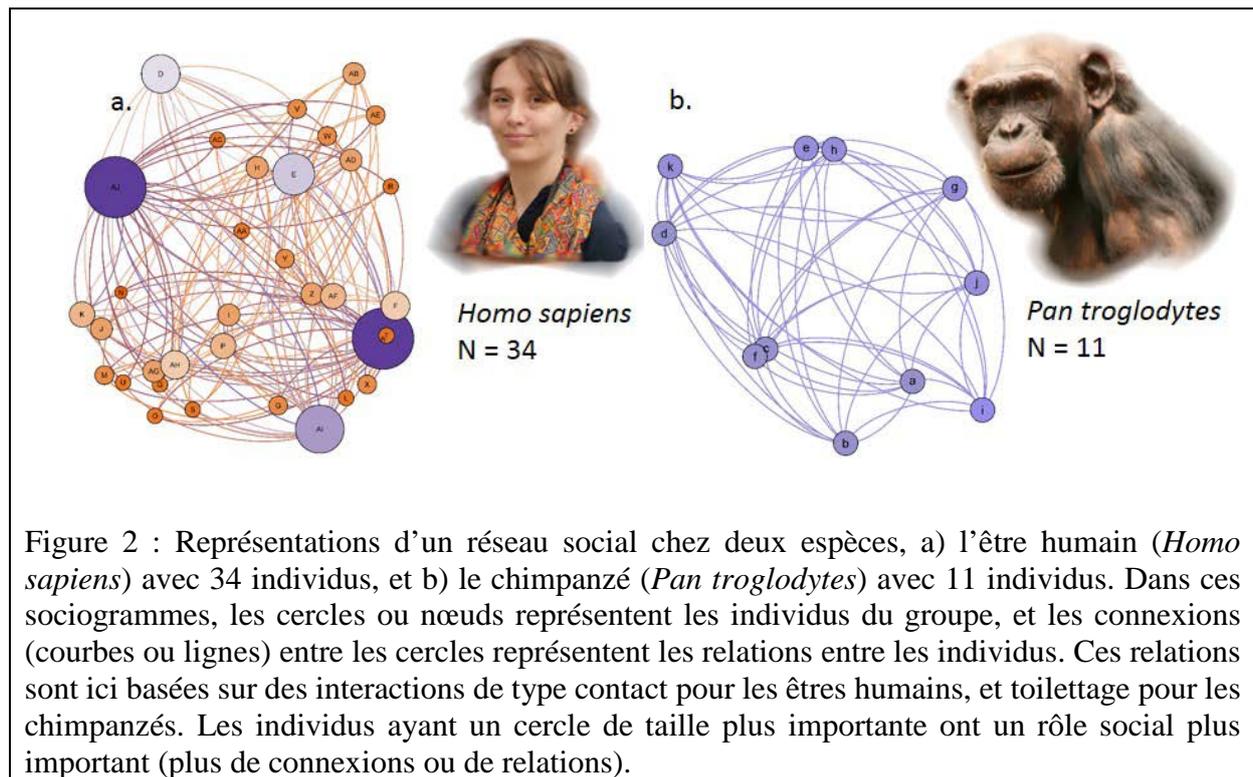
Hinde, en tant qu'éthologiste, a introduit une approche ascendante (*bottom-up*) dans l'étude des structures sociales, alors qu'Espinas (1878) ou encore Wilson dans son livre majeur, *La sociobiologie* (1980), favorisent une approche descendante (*top-down*) de la structure sociale, essayant de classer les réseaux et de comprendre le pourquoi de ces différences structurelles. L'Analyse des Réseaux Sociaux (SNA, *Social Network Analysis*, Wasserman & Faust 1994; Watts 2004; Whitehead 2008) permet d'intégrer ces deux approches en un seul programme de recherche (Newman 2003; Whitehead 2008). En effet, en analysant la structure du réseau social et des processus responsables de cette structure, vient naturellement la question « pourquoi cette structure, cette forme ? », et donc les fonctions adaptatives. De la même façon, en analysant la structure dans sa globalité, vient naturellement la question des mécanismes permettant son émergence, et donc les processus sociaux.



L'analyse des réseaux sociaux est un outil utilisé pour étudier la structure sociale des sociétés à toute échelle, de l'individu à la population (sous-groupes, groupes ou métagroupes d'individus). Un réseau social dans sa plus simple forme est un ensemble d'entités sociales, dits « nœuds » et représentant les individus, et de liens, aussi dits connexions ou relations entre ces entités (Figure 2, Wasserman & Faust 1994). Il est à remarquer que la relation se définit comme la somme (réelle ou observée) des interactions positives ou négatives, il s'agit donc d'une définition plus large que celle proposée par Hinde (1976). Hinde (1976) fait une distinction supplémentaire entre structure superficielle (surface structure) et structure profonde (deep structure) : la première est constituée par le réseau des relations sociales (comme un simple

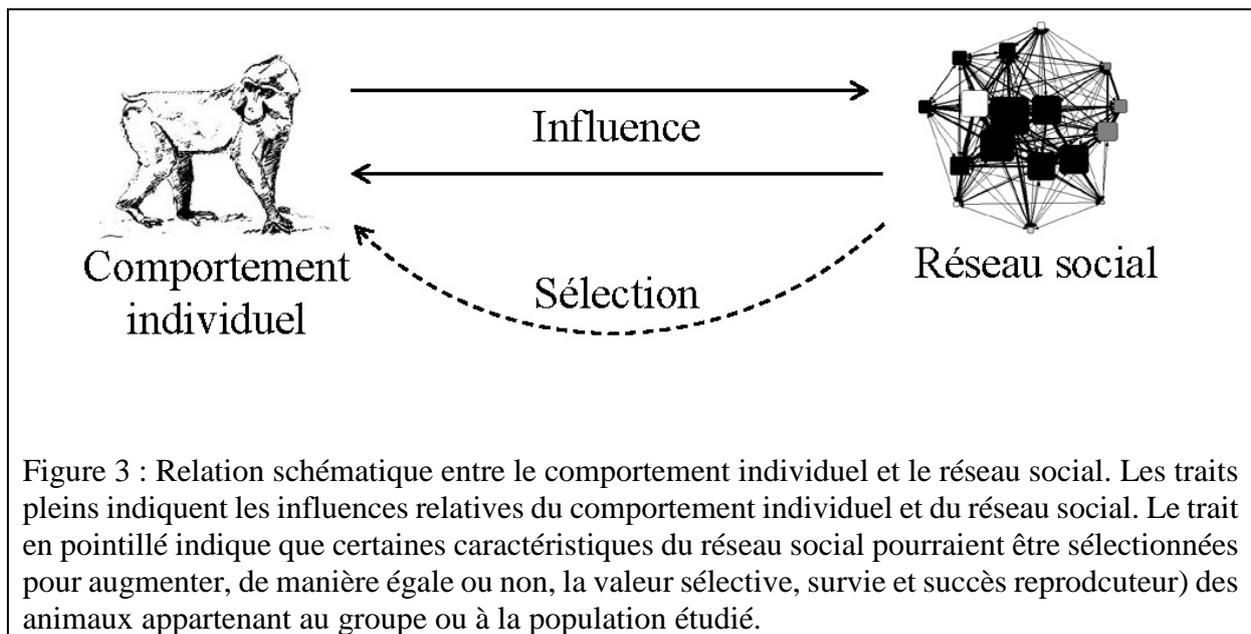
dessin du réseau), la seconde est le réseau abstrait au sens structuraliste de Lévi-Strauss construit pour rendre compte de la forme et du fonctionnement d'une organisation sociale (Lévi-Strauss 1958; Lévi-Strauss et al. 1974). L'analyse des réseaux sociaux ne considère pas le réseau comme une simple abstraction (sans effet causal) mais comme un collectif d'individus organisés en réseau, auquel cas en effet il peut y avoir effet causal et rétroaction comme indiqués dans le figure 1.

L'analyse des réseaux réunit différents modules de visualisation graphique et d'algorithmes mathématiques permettant la détection et la quantification de patterns de réseaux sociaux, allant du niveau individuel (Borgatti 2006; Bonacich 2007) au niveau du groupe (Girvan and Newman 2002; Newman 2004). Les sociogrammes sont des diagrammes où figurent les nœuds et les relations. Ils ont été employés pour la première fois en sociologie par Moreno (1934) en tant que représentations purement qualitatives. Ils ont été ensuite utilisés à partir des années soixante à titre de description quantitative dans l'étude des systèmes sociaux des animaux : l'épaisseur des traits figurant les relations reflétaient la fréquence des interactions entre individus (Sade 1965; Kummer 1968). On peut faire remonter l'origine du concept de réseau plus loin encore, aux prémisses de la théorie des graphes en mathématiques (Euler, 1736 : Bigg et al. 1976). L'application de cette théorie à l'étude des réseaux sociaux émerge en psychologie et en sociologie dans la première moitié du XX^e siècle (Scott 2000). Cependant, ces analyses et leur utilisation ont subi une rapide transformation au début des années 2000 en raison du développement des technologies de calcul, affectant directement l'analyse des réseaux sociaux, mais également du fait des progrès des technologies de communication et de transport qui ont conduit à une interconnexion planétaire. Le fait que nous soyons de plus en plus connectés, *"Facebook cuts six degrees of separation to four"*, est pour beaucoup dans l'intérêt grandissant que suscite l'analyse des réseaux sociaux.



Les réseaux sociaux des sociétés humaines ont été étudiés dans de nombreux domaines que sont les transports (réseaux aériens, ferroviaires ou routiers : Sen et al. 2003; Colizza et al. 2006), la communication (diffusion des rumeurs : Moreno et al. 2004 ; World Wide Web : Tadić 2001) ou la médecine (diffusion des pathogènes : Tuckwell et al. 1998; Pastor-Satorras & Vespignani 2001). Mais quel est l'intérêt de ces analyses dans l'étude du comportement animal ? L'analyse des réseaux sociaux permet d'étudier la structure sociale elle-même, dans son ensemble mais également à différents niveaux (Hinde 1976; Krause et al. 2009). Grâce aux analyses conventionnelles, nous pouvons explorer la structure sociale d'un groupe au niveau de l'individu, de la dyade ou du groupe. L'analyse des réseaux sociaux établit un lien entre ces différents niveaux jusqu'à celui de la population. Elle permet d'objectiver différentes dimensions, par exemple la transitivité, l'organisation en triades ou bien en agrégats ou *clusters*. En outre, différents types d'interactions, qu'elles soient intra-groupe, inter-groupe ou même inter-espèce (interactions entre proies et prédateurs, par exemple) peuvent être analysées avec les mêmes méthodes. Cette généralité d'application signifie que nous pouvons, en tant que

scientifiques, étudier comment le comportement de l'individu influence le réseau social, mais que nous pouvons également déterminer l'influence du réseau social et ses propriétés sur la survie et la reproduction des animaux constituant le groupe ou la population (Figure 3). Ce type de boucle de rétroaction est essentiel dans la compréhension de l'émergence et de la stabilité des systèmes sociaux (Camazine et al. 2003; Couzin and Krause 2003; Thierry et al. 2004).



Différentes études ont montré que les caractéristiques du réseau social – modularité, centralité, densité, etc. – peuvent entraîner d'importantes répercussions pour les individus. Il apparaît que dans certaines espèces les individus centraux vivent plus longtemps (mâles dauphins, *Tursiops truncatus* : Stanton & Mann 2012), qu'ils ont une progéniture ayant une plus grande espérance de vie (femelles babouins, *Papio ursinus* : Silk et al. 2003), ou qu'ils obtiennent un succès reproducteur plus élevé (mâles coléoptères, *Bolitotherus cornutus* : Formica et al. 2012). La *fitness* peut se voir également affectée négativement par la centralité sociale. Par exemple, les femelles centrales chez le macaque japonais (*Macaca fuscata*) ont plus de parasites intestinaux en nombre et en diversité, en raison d'une fréquence plus élevée de contacts sociaux (MacIntosh

et al. 2012). La question se pose donc alors du compromis à réaliser par chaque individu entre avantages et inconvénients de la position centrale.

Les individus de toutes les espèces animales, solitaires ou sociales (Aron and Passera 2000), interagissent, que ce soit pour la reproduction ou dans un contexte de compétition alimentaire. Les espèces dites grégaires tels que certaines espèces d'insectes (Amé et al. 2006; Bazazi et al. 2008), d'ongulés (Gautrais et al. 2007; Fischhoff et al. 2009) ou de poissons vivant en banc (Bonabeau and Dagorn 1995; Couzin et al. 2005) se regroupent pour diminuer le risque de prédation ou s'informer sur les ressources alimentaires, sans pour autant développer de relations sociales. En général, il ne leur est pas possible de reconnaître individuellement chacun de leurs congénères. Quoi qu'il en soit, la dynamique et la structure de leurs interactions restent importantes à étudier pour comprendre leur socio-écologie : quelles sont les règles d'agrégation ? Comment l'information ou les maladies sont-elles transmises au sein des populations ? Comment les facteurs écologiques influencent-ils la socialité de l'espèce. Dans les espèces sub-sociales, les individus peuvent coopérer dans l'élevage des jeunes, la recherche alimentaire ou bien la protection des membres du groupe contre les prédateurs ou les groupes compétiteurs. Le niveau de socialité le plus élevé est ce que l'on qualifie d'eusocialité, présente chez les hyménoptères (fourmis et abeilles) et les isoptères (termites). Chez ces espèces, les individus se spécialisent en différentes castes, chacune affectée à des tâches particulières (protection, recherche alimentaire, soin au nid, reproduction) au sein de la colonie ou de l'essaim ; les individus ne se reconnaissent pas individuellement, mais étudier comment entrent en interaction les membres des différentes castes est crucial pour comprendre le fonctionnement de la société. Il s'agit par exemple d'évaluer le degré d'optimisation de la distribution de la nourriture par trophallaxie (régurgitation de la nourriture pré-digérée contenue dans le jabot social afin de nourrir d'autres insectes de la colonie) au sein de toute la colonie, ou l'efficience

de la transmission d'information dans l'exploitation des ressources (Buffin et al. 2009; Buffin et al. 2011).

Les primates et les cétacés qui présentent des relations sociales complexes – reconnaissance individuelle avec distinction en fonction de la parenté, la dominance, l'âge ou d'autres caractéristiques – font partie des espèces dites communales, mais les critères de classification de la socialité des espèces sont encore discutées et certains les classent dans les espèces eusociales. Chez ces animaux, les relations qui se développent à l'intérieur de chaque dyade d'individus peuvent se voir comme des stratégies individuelles de coopération ou de compétition (Byrne and Whiten 1988).

L'étude des réseaux sociaux est souvent déterminante dans la compréhension de la biologie et la distribution des populations influençant la valeur sélective des individus (Silk et al. 2003; Formica et al. 2012; Stanton and Mann 2012), le flux des gènes, des pathogènes ou encore l'émergence des traditions (Griffin and Nunn 2012; Cantor and Whitehead 2013). A cet égard, l'analyse des réseaux sociaux devient un outil essentiel dans la gestion et la conservation de la faune sauvage. Par exemple, la vaccination des individus centraux dans une population de chimpanzés est susceptible de limiter des épidémies de pathogènes comme le virus Ebola (Rushmore et al. 2013). En captivité, repérer les individus centraux ou les plus agressifs peut également aider à la décision lorsqu'il s'agit d'enlever un individu afin de diminuer le stress de l'ensemble des membres du groupe (McCowan et al. 2008).

Etant donné que les taux de mortalité, le succès reproducteur ou la dispersion des individus d'un groupe semblent être fortement affectés par la structure d'un réseau social, ce réseau pourrait donc avoir une fonction adaptative pour les membres du groupe, adaptation évolutive se faisant par des processus de sélection naturelle ou culturelle (Soltis et al. 1995; Traulsen and Nowak 2006; Whitehead 2008). Il pourrait également influencer les autres traits sociaux. Par exemple, les interactions entre apparentés peuvent influencer l'évolution de la socialité en

affectant la valeur sélective (Hamilton 1964). L'évolution de la coopération dépend également de la structure sociale (Trivers 1985; Nowak 2006). La structure sociale aurait également une forte influence sur l'évolution des dimorphismes sexuels (Lindenfors et al. 2002), la communication (Bradbury and Vehrencamp 1998) et la cognition (Byrne and Whiten 1988; Lehmann and Dunbar 2009). Les propriétés des réseaux sociaux d'une espèce pourraient se voir modifiées afin de diminuer les risques de transmission de pathogènes entre les membres du groupe (Altizer et al. 2003; Nunn & Altizer 2006).

Les réseaux sociaux méritent que les scientifiques s'y attardent et les étudient. Quoique l'origine et le support de cette évolution reste encore indéterminés, l'étude de l'influence des propriétés des réseaux sociaux sur la survie et la reproduction des membres du groupe est primordiale pour comprendre l'évolution des sociétés, et en particulier l'évolution des traditions et du conformisme qui restent peu étudiés dans les réseaux non humains.

Références

- Alexander RD (1974) The Evolution of Social Behavior. *Annu Rev Ecol Syst* 5:325–383.
- Allen TJ (1984) Managing the flow of technology: Technology transfer and the dissemination of technological information within the R&D organization. MIT Press Books 1:
- Altizer S, Nunn CL, Thrall PH, et al (2003) Social organization and parasite risk in mammals: integrating theory and empirical studies. *Annu Rev Ecol Evol Syst* 517–547.
- Amé J-M, Halloy J, Rivault C, et al (2006) Collegial decision making based on social amplification leads to optimal group formation. *Proc Natl Acad Sci U S A* 103:5835–5840.
- Aron S, Passera L (2000) Les sociétés animales: évolution de la coopération et organisation sociale. De Boeck Supérieur
- Axelrod R, Hamilton W (1981) The evolution of cooperation. *Science* 211:1390–1396. doi: 10.1126/science.7466396
- Barrett L, Henzi SP, Lusseau D (2012) Taking sociality seriously: the structure of multi-dimensional social networks as a source of information for individuals. *Philos Trans R Soc B Biol Sci* 367:2108–2118. doi: 10.1098/rstb.2012.0113

- Battesti M, Moreno C, Joly D, Mery F (2012) Spread of Social Information and Dynamics of Social Transmission within *Drosophila* Groups. *Curr Biol* 22:309–313. doi: 10.1016/j.cub.2011.12.050
- Bazazi S, Buhl J, Hale JJ, et al (2008) Collective motion and cannibalism in locust migratory bands. *Curr Biol CB* 18:735–739. doi: 10.1016/j.cub.2008.04.035
- Bigg NL, Lloyd EK, Wilson RJ (1976) *Graph Theory: 1736-1936*. Oxford University Press
- Bonabeau E, Dagorn L (1995) Possible universality in the size distribution of fish schools. *Phys Rev E* 51:R5220. doi: 10.1103/PhysRevE.51.R5220
- Bonacich P (2007) Some unique properties of eigenvector centrality. *Soc Netw* 29:555–564. doi: 10.1016/j.socnet.2007.04.002
- Borgatti SP (2006) Identifying sets of key players in a social network. *Comput Math Organ Theory* 12:21–34. doi: 10.1007/s10588-006-7084-x
- Boyd R, Richerson PJ (1992) Punishment allows the evolution of cooperation (or anything else) in sizable groups. *Ethol Sociobiol* 13:171–195. doi: 10.1016/0162-3095(92)90032-Y
- Bradbury JW, Vehrencamp SL (1998) *Principles of animal communication*. Sinauer Associates
- Buffin A, Deneubourg J-L, Goldman S (2011) Food flow and stock management in an ant colony/Flux alimentaire et gestion des stocks dans une colonie de fourmis.
- Buffin A, Denis D, Van Simaey G, et al (2009) Feeding and Stocking Up: Radio-Labelled Food Reveals Exchange Patterns in Ants. *PLoS ONE* 4:e5919. doi: 10.1371/journal.pone.0005919
- Bull CM, Godfrey SS, Gordon DM (2012) Social networks and the spread of *Salmonella* in a sleepy lizard population. *Mol Ecol* 21:4386–4392. doi: 10.1111/j.1365-294X.2012.05653.x
- Byrne RW, Whiten A (1988) *Machiavellian intelligence: social expertise and the evolution of intellect in monkeys, apes, and humans*. Clarendon Press
- Camazine S, Deneubourg J-L, Franks NR, et al (2003) *Self-organization in biological systems*. Princeton University Press
- Cantor M, Whitehead H (2013) The interplay between social networks and culture: theoretically and among whales and dolphins. *Philos Trans R Soc B Biol Sci*. doi: 10.1098/rstb.2012.0340
- Chapman CA, Bowman DD, Ghai RR, et al (2012) Protozoan parasites in group-living primates: testing the biological island hypothesis. *Am J Primatol* 74:510–517. doi: 10.1002/ajp.20992

- Christley RM, Pinchbeck GL, Bowers RG, et al (2005) Infection in Social Networks: Using Network Analysis to Identify High-Risk Individuals. *Am J Epidemiol* 162:1024–1031. doi: 10.1093/aje/kwi308
- Colizza V, Barrat A, Barthélemy M, Vespignani A (2006) The role of the airline transportation network in the prediction and predictability of global epidemics. *Proc Natl Acad Sci U S A* 103:2015–2020. doi: 10.1073/pnas.0510525103
- Couzin ID, Krause J (2003) *Self-Organization and Collective Behavior in Vertebrates*. Academic Press, pp 1–75
- Couzin ID, Krause J, Franks NR, Levin SA (2005) Effective leadership and decision-making in animal groups on the move. *Nature* 433:513–516. doi: 10.1038/nature03236
- Croft DP, James R, Krause J (2008) *Exploring Animal Social Networks*. Princeton University Press
- Cross R, Parker A (2004) *The hidden power of social networks: Understanding how work really gets done in organizations*. Harvard Business Press
- Danchin E, Giraldeau L-A, Valone TJ, Wagner RH (2004) Public information: from nosy neighbors to cultural evolution. *Science* 305:487–491. doi: 10.1126/science.1098254
- Espinas AV (1878) *Des sociétés animales*. G. Bailliére et cie
- Fischhoff I, Dushoff J, Sundaresan S, et al (2009) Reproductive status influences group size and persistence of bonds in male plains zebra (*Equus burchelli*). *Behav Ecol Sociobiol* 63:1035–1043. doi: 10.1007/s00265-009-0723-8
- Formica VA, Wood CW, Larsen WB, et al (2012) Fitness consequences of social network position in a wild population of forked fungus beetles (*Bolitotherus cornutus*). *J Evol Biol* 25:130–137. doi: 10.1111/j.1420-9101.2011.02411.x
- Freeland WJ (1976) Pathogens and the Evolution of Primate Sociality. *Biotropica* 8:12–24.
- Freeland WJ (1979) Primate Social Groups as Biological Islands. *Ecology* 60:719–728.
- Gautrais J, Michelena P, Sibbald A, et al (2007) Allelomimetic synchronization in Merino sheep. *Anim Behav* 74:1443–1454. doi: 10.1016/j.anbehav.2007.02.020
- Girvan M, Newman MEJ (2002) Community structure in social and biological networks. *Proc Natl Acad Sci U S A* 99:7821–7826. doi: 10.1073/pnas.122653799
- Griffin RH, Nunn CL (2012) Community structure and the spread of infectious disease in primate social networks. *Evol Ecol* 26:779–800.
- Hamilton WD (1971) Geometry for the selfish herd. *J Theor Biol* 31:295–311. doi: 10.1016/0022-5193(71)90189-5
- Hamilton WD (1964) The genetical evolution of social behaviour. II. *J Theor Biol* 7:17–52.
- Hinde RA (1976) *Interactions, Relationships and Social Structure*. *Man* 11:1–17.

- Huffman MA, Chapman CA (2009) Primate parasite ecology: the dynamics and study of host-parasite relationships. Cambridge University Press
- Janson CH, Goldsmith ML (1995) Predicting group size in primates: foraging costs and predation risks. *Behav Ecol* 6:326–336. doi: 10.1093/beheco/6.3.326
- King AJ, Sueur C (2011) Where Next? Group Coordination and Collective Decision Making by Primates. *Int J Primatol* 32:1245–1267. doi: 10.1007/s10764-011-9526-7
- Krause J, Lusseau D, James R (2009) Animal social networks: an introduction. *Behav Ecol Sociobiol* 63:967–973. doi: 10.1007/s00265-009-0747-0
- Krause J, Ruxton GD (2002) Living in groups. Oxford University Press
- Lefebvre D, Ménard N, Pierre JS (2003) Modelling the influence of demographic parameters on group structure in social species with dispersal asymmetry and group fission. *Behav Ecol Sociobiol* 53:402–410. doi: 10.1007/s00265-002-0578-8
- Lehmann J, Dunbar RIM (2009) Network cohesion, group size and neocortex size in female-bonded Old World primates. *Proc R Soc B Biol Sci* 276:4417–4422. doi: 10.1098/rspb.2009.1409
- Lévi-Strauss C (1958) La notion de structure en ethnologie. *Anthropol Struct* 303–50.
- Lévi-Strauss C, Ethnologue F, Lévi-Strauss C, et al (1974) *Anthropologie structurale*. Plon Paris
- Lindenfors P, Tullberg BS, Biuw M (2002) Phylogenetic analyses of sexual selection and sexual size dimorphism in pinnipeds. *Behav Ecol Sociobiol* 52:188–193.
- MacIntosh AJJ, Alados CL, Huffman MA (2011) Fractal analysis of behaviour in a wild primate: behavioural complexity in health and disease. *J R Soc Interface*. doi: 10.1098/rsif.2011.0049
- MacIntosh AJJ, Jacobs A, Garcia C, et al (2012) Monkeys in the Middle: Parasite Transmission through the Social Network of a Wild Primate. *PLoS ONE* 7:e51144. doi: 10.1371/journal.pone.0051144
- McCowan B, Anderson K, Heagarty A, Cameron A (2008) Utility of social network analysis for primate behavioral management and well-being. *Appl Anim Behav Sci* 109:396–405. doi: 10.1016/j.applanim.2007.02.009
- Melnick DJ, Kidd KK (1983) The genetic consequences of social group fission in a wild population of rhesus monkeys (*Macaca mulatta*). *Behav Ecol Sociobiol* 12:229–236. doi: 10.1007/BF00290775
- Newman ME (2003) The structure and function of complex networks. *SIAM Rev* 45:167–256.
- Newman MEJ (2004) Analysis of weighted networks. *Phys Rev E* 70:056131. doi: 10.1103/PhysRevE.70.056131

- Nowak MA (2006) Five Rules for the Evolution of Cooperation. *Science* 314:1560–1563. doi: 10.1126/science.1133755
- Nunn CL, Altizer S (2006) *Infectious diseases in primates: Behavior, ecology and evolution*. Oxford University Press
- Nunn CL, Altizer S, Altizer SM (2006) *Infectious diseases in primates: behavior, ecology and evolution*. Oxford University Press
- Pastor-Satorras R, Vespignani A (2001) Epidemic Spreading in Scale-Free Networks. *Phys Rev Lett* 86:3200–3203. doi: 10.1103/PhysRevLett.86.3200
- Petit O, Bon R (2010) Decision-making processes: the case of collective movements. *Behav Processes* 84:635–647. doi: 10.1016/j.beproc.2010.04.009
- Rushmore J, Caillaud D, Matamba L, et al (2013) Social network analysis of wild chimpanzees provides insights for predicting infectious disease risk. *J. Anim. Ecol.*
- Scott J (2000) *Social network analysis: a handbook*. SAGE
- Sen P, Dasgupta S, Chatterjee A, et al (2003) Small-world properties of the Indian railway network. *Phys Rev E* 67:036106. doi: 10.1103/PhysRevE.67.036106
- Silk JB, Alberts SC, Altmann J (2003) Social bonds of female baboons enhance infant survival. *Science* 302:1231–1234. doi: 10.1126/science.1088580
- Soltis J, Boyd R, Richerson PJ (1995) Can group-functional behaviors evolve by cultural group selection?: An empirical test. *Curr Anthropol* 473–494.
- Stanton MA, Mann J (2012) Early Social Networks Predict Survival in Wild Bottlenose Dolphins. *PLoS ONE* 7:e47508. doi: 10.1371/journal.pone.0047508
- Sueur C (2011) Social Network, Information Flow and Decision-Making Efficiency: A Comparison of Humans and Animals. *Soc. Netw. Community Behav. Model.*
- Sueur C (2012) Viability of decision-making systems in human and animal groups. *J Theor Biol* 306:93–103. doi: 10.1016/j.jtbi.2012.04.020
- Sueur C, Deneubourg J-L, Petit O, Couzin ID (2010) Differences in Nutrient Requirements Imply a Non-Linear Emergence of Leaders in Animal Groups. *PLoS Comput Biol* 6:e1000917. doi: 10.1371/journal.pcbi.1000917
- Sueur C, King AJ, Pelé M, Petit O (2014) Fast and Accurate Decisions as a Result of Scale-Free Network Properties in Two Primate Species. In: Gilbert T, Kirkilionis M, Nicolis G (eds) *Proc. Eur. Conf. Complex Syst. 2012*. Springer International Publishing, pp 579–584
- Tadić B (2001) Dynamics of directed graphs: the world-wide Web. *Phys Stat Mech Its Appl* 293:273–284. doi: 10.1016/S0378-4371(01)00014-0
- Thierry B, Singh M, Kaumanns W (2004) *Macaque societies: a model for the study of social organization*. Cambridge University Press

- Traulsen A, Nowak MA (2006) Evolution of cooperation by multilevel selection. *Proc Natl Acad Sci* 103:10952–10955. doi: 10.1073/pnas.0602530103
- Trivers R (1985) *Social evolution*. Benjamin/Cummings Publishing Company Menlo Park
- Tuckwell HC, Toubiana L, Vibert J-F (1998) Spatial epidemic network models with viral dynamics. *Phys Rev E* 57:2163–2169. doi: 10.1103/PhysRevE.57.2163
- Waal F de (2007) *Chimpanzee Politics: Power and Sex among Apes*. JHU Press
- Wasserman S, Faust K (1994) *Social network analysis: methods and applications*. Cambridge University Press
- Watts DJ (2004) *Six degrees: the science of a connected age*. W. W. Norton & Company, New York N.Y.
- Whitehead H (2008) *Analyzing animal societies: quantitative methods for vertebrate social analysis*. University of Chicago Press
- Wilson E (1980) (1975) *Sociobiology: The New Synthesis*. Cambridge: Harvard
- Wrangham RW (1980) An Ecological Model of Female-Bonded Primate Groups. *Behaviour* 75:262–300.