

LA STRATÉGIE SOUS-JACENTE AUX INFÉRENCES STATISTIQUES CHEZ LA CORNEILLE NOIRE

Pier-Olivier Caron

Université TÉLUQ, Département des Sciences humaines, Lettres et Communication

Confrontés à l'optimisation de leurs choix, les organismes adoptent des stratégies de prise de décision influencées par leurs expériences antérieures. Comme plusieurs autres espèces animales, les corneilles utilisent de l'information limitée pour tirer des conclusions sur la probabilité d'un événement, l'inférence statistique, un élément essentiel de la prise de décision selon Johnston et al. (2023). À l'aide de données antérieures, nous réanalysons les choix des corneilles noires afin de mieux comprendre leur inférence statistique dans un programme de renforcement concurrent à choix forcé. Les résultats montrent que les deux oiseaux ont effectué le choix optimal dans 79,5 % et 82,7 % des cas. La corneille 1 présente un sous-appariement, c'est-à-dire une tendance à surestimer la valeur renforçante des stimuli moins renforcés, $\beta_1 = ,766, p < ,001$, et une forte préférence pour les stimuli présentés à gauche, $\beta_0 = ,201, p < ,001$; $R^2 = ,674, p < ,001$. La corneille 2 présente un appariement presque strict, les ratios des choix correspondent aux ratios des probabilités, $\beta_1 = ,946, p < ,001$, et aucune préférence pour les stimuli présentés à droite ou à gauche, $\beta_0 = -,036, p = ,130$; $R^2 = ,596, p < ,001$. Ces résultats soutiennent que non seulement les corneilles utilisent les probabilités de renforcement associées aux stimuli visuels, mais suivent les fluctuations des renforçateurs, ce qui réduit leur dépendance aux taux de renforcement appris, une stratégie adaptative dans un environnement instable.

See end of text for English abstract.

Mots-clés : Appariement, appariement probabiliste, appariement comportemental, corneilles, maximisation, inférence statistique.

Correspondance : Pier-Olivier Caron, Département des Sciences humaines, Lettres et Communication, Université TÉLUQ, 5800, rue Saint-Denis, Bureau 1105, Montréal, QC, H2S 3L5
Courriel: pier-olivier.caron@teluq.ca

Introduction

Johnston et al. (2023) cherchent à savoir si les corneilles peuvent apprendre les probabilités de renforcement de stimuli arbitraires et s'ils sont en mesure d'utiliser ces connaissances lorsqu'elles doivent choisir entre plusieurs combinaisons de stimuli. Cette expérimentation rappelle la tâche d'appariement probabiliste (*probability matching*; Bullock & Bitterman, 1962; Estes, 1957; Shimp, 1973), un exemple bien connu de comportement supposément irrationnel (Saldana et al., 2022; Vulkan, 2000), dans laquelle les participants doivent choisir entre deux options associées à des probabilités de renforcement différentes. Trois stratégies sont possibles dans cette expérience : a) la stratégie de maximisation selon laquelle les participants choisissent toujours l'option ayant la probabilité de renforcement la plus élevée (la stratégie optimale) ; b) la stratégie d'appariement des probabilités (appariement probabiliste) selon laquelle les choix des participants correspondent aux probabilités des deux options ; ou c) la stratégie de surappariement selon laquelle les participants choisissent plus souvent l'option ayant la plus forte probabilité de renforcement, mais choisissent parfois l'option associée à une probabilité moindre. Une fois la distinction entre des stimuli arbitraires et les probabilités de renforcement qui leur sont associées est apprise par les oiseaux, quel est le mécanisme qui sous-tend leurs choix ? Johnston et al. (2023) proposent alors une hypothèse neurocognitive innovante : l'inférence statistique, soit la capacité d'utiliser des informations limitées pour tirer des conclusions sur la probabilité d'un événement, pour expliquer le choix des corneilles.

Une autre stratégie bien connue pour décrire les choix dans les programmes concurrents est la loi de l'appariement appelée également l'appariement comportemental (*matching law* et *matching behavior*; Herrnstein, 1958) selon laquelle les choix ne dépendent pas du taux absolu de renforçateur, mais plutôt de leurs taux relatifs. Sur le plan statistique, l'appariement comportemental généralisé (Baum, 1974), une version plus flexible et robuste de la version originale d'Herrnstein

(voir Caron, 2017, à cet effet), est une régression entre les logarithmes des ratios de renforçateurs et les logarithmes des ratios de choix, dans laquelle la pente (β_1) est la sensibilité au renforcement et l'intercept (β_0) est une préférence constante pour une des option. L'appariement comportemental généralisé prend la forme mathématique suivante :

$$\log\left(\frac{C_1}{C_2}\right) = \beta_0 + \beta_1 \log\left(\frac{R_1}{R_2}\right)$$

où R_i est le taux de renforçateurs obtenu avec l'option i et C_i est le choix de l'option i .

Méthode

Nous réanalysons les données de Johnston et al. (2023) dans lesquelles les auteurs rapportent les résultats du conditionnement de deux corneilles noires à associer neuf stimuli à différentes probabilités de renforcement allant de 10 % à 90 % (par incréments de 10 %) avant de leur présenter un programme de renforcement concurrent à choix forcé¹. Nous avons calculé le pourcentage de choix optimaux, le choix attendu de maximisation, le choix attendu d'appariement probabiliste et l'appariement comportemental. Nous avons utilisé les techniques statistiques recommandées pour les analyses d'appariement comportemental, telles que l'estimation de la variable instrumentale pour obtenir une estimation non biaisée des paramètres de régression (Jensen, 2019) et l'estimation de la vraisemblance à information complète (*full information maximum likelihood*) pour traiter les valeurs indéfinies causées par la non-occurrence de renforçateur ou de choix (Caron, 2024). La méthode complète employée par Johnston et al. est disponible dans l'étude originale et celle-ci est approuvée par les méthodes STAR (rapport structuré, transparent et accessible, *Structured, Transparent, Accessible Reporting*) de CellPress².

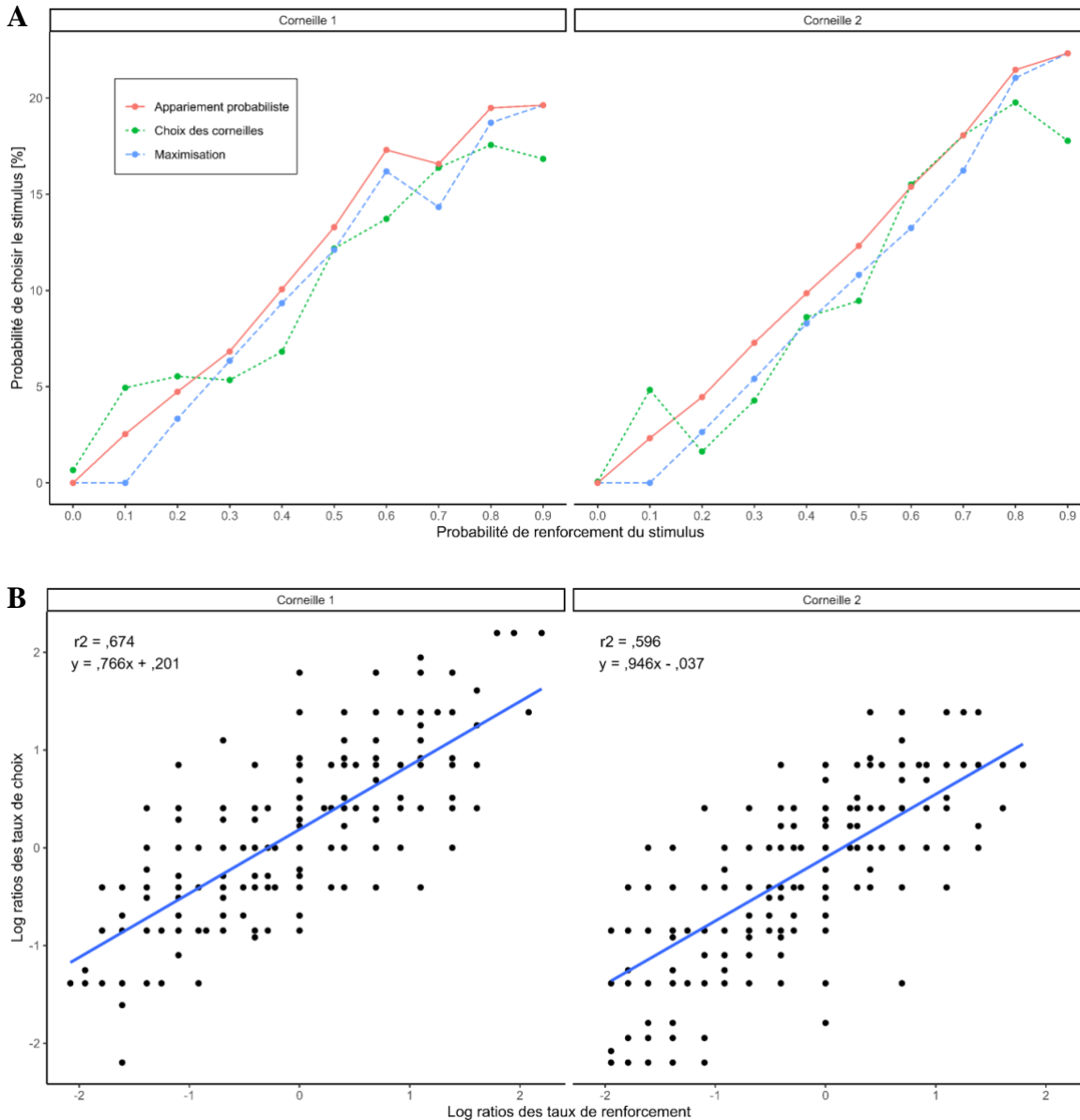
Résultats

Les résultats montrent que les deux corneilles noires font le choix optimal dans 79,5 % et 82,7 % des cas respectivement. La Figure 1a illustre pour chaque corneille : 1) la maximisation en bleu, c'est-à-dire la fréquence de choix attendue des corvidés s'ils choisissent toujours l'option optimale ; 2) l'appariement probabiliste en orange, c'est-à-dire la fréquence de choix attendue des corvidés si les probabilités de leurs choix correspondent aux probabilités de renforcement; et 3) la fréquence réelle des choix des corvidés en vert. Avec le jeu de données disponibles, il n'a pas été possible de déduire quelle stratégie de prise de décision a été utilisée (maximisation ou appariement probabiliste) étant donné qu'il n'y avait pas de différences statistiques entre les deux stratégies et le choix. Néanmoins, la Figure 1a montre que les corneilles sont susceptibles de surestimer la valeur renforçante des stimuli associés à des taux de renforcement plus faibles et de sous-estimer la valeur renforçante des stimuli associés à des taux de renforcement plus élevés. La Figure 1b

illustre l'appariement comportemental des deux corneilles. La corneille 1 présente un sous-appariement, $\beta_1 = ,766, p < ,001$, c'est-à-dire une tendance à surestimer les stimuli moins renforçants, ainsi qu'une forte préférence pour les stimuli présentés à gauche, $\beta_0 = ,201, p < ,001$; $R^2 = ,674, p < ,001$. La corneille 2 montre un appariement presque strict, les ratios des choix du corvidé correspondent aux ratios des probabilités, $\beta_1 = ,946, p < ,001$, et aucune préférence pour les stimuli de droite ou de gauche, $\beta_0 = -,036, p = ,130$; $R^2 = ,596, p < ,001$.

Figure 1

Représentation des stratégies de maximisation et d'appariement probabiliste, et appariement comportemental généralisé des corneilles



Note. A) Chaque cadran illustre la fréquence attendue de choix pour chaque probabilité de renforcement d'une corneille. Les lignes bleues et oranges montrent les fréquences attendues pour la maximisation et l'appariement probabiliste, respectivement. La ligne verte représente les choix réels des corvidés. B) Chaque cadran illustre l'appariement comportemental d'une corneille. Les valeurs de sensibilité (pente), de préférence (intercept) et de variance expliquée (R^2) sont inscrites dans le coin supérieur gauche de chaque cadran. Les résultats montrent un sous-appariement pour la corneille 1 et un appariement strict pour la corneille 2, ainsi qu'une préférence pour les stimuli de gauche pour la corneille 1 et aucune préférence pour la corneille 2.

Discussion

L'objectif de cette étude est de réanalyser les données de Johnston et al. (2023) sur l'inférence statistique des corneilles noires afin d'expliquer les stratégies comportementales sous-jacente à leurs choix. Les données recueillies ne permettent pas d'établir exactement quelle stratégie est employée. Toutefois, l'appariement comportemental montre un excellent potentiel explicatif

des choix des corneilles dans cette expérimentation. Les résultats obtenus sont proches des résultats d'autres expériences sur l'appariement comportementale (Caron, 2017; McDowell, 2013), avec des R^2 très élevés, des pentes près de 1 ou inférieures. Le seul résultat inhabituel est la forte préférence de la corneille 1 pour les stimuli de gauche. Aucune réanalyse des données ne permet d'explication à cet effet.

Les données actuelles présentent certaines limites, car leur conception expérimentale diffère de celle de la plupart des études sur l'appariement comportemental (Caron, 2017; McDowell, 2013). Habituellement, les données sont collectées jusqu'à ce que le participant présente un patron comportemental stable, preuve qu'il maximise la valeur subjective des renforçateurs qu'il obtient (Rachlin et al., 1981). Cela dit, les résultats soutiennent que non seulement les corneilles apprennent les probabilités de renforcement associées aux stimuli visuels, mais qu'elles ajustent leurs choix en fonction des fluctuations relatives des renforçateurs de manière à minimiser leur dépendance à l'égard de leurs expériences antérieures. Il s'agit d'une stratégie d'adaptation dans un environnement volatile, efficace dans les milieux naturels, car la disponibilité de la nourriture peut être instable dans le temps.

Si l'expérimentation et les données ne permettent pas de différencier la maximisation, l'appariement probabiliste et l'appariement comportemental avec ces données, il est pourtant bien connu depuis les années 60 que les animaux ajustent leur comportement en suivant les fluctuations des renforçateurs, fluctuations qui comportent toujours une certaine incertitude. Recourir à un construit hypothétique comme l'inférence statistique pour rendre compte de ce phénomène est d'une portée limitée. Cette interprétation neurocognitive d'un constat comportemental bien établi nous en apprend plus sur le neurocognitivism que sur les comportements des corneilles.

1 Les données sont accessibles en libre accès : <https://datadryad.org/stash/share/iAogVMtOcm53SjMNzbNVsMVR4UWmKTutydJWiSPvz-w>.

2 Les détails de la méthode STAR sont disponibles sur cette page : <https://www.cell.com/star-methods>

Abstract

Faced with deciding on choices' optimization, foragers adopt decision-making strategies influenced by their previous experiences. Crows have been shown to use limited information to conclude the likelihood of an event, i.e., statistical inference, as critical component for decision-making. Using previous data (Johnston et al., 2023), we reanalyze crows' choices to better grasp their behavioural strategy in a forced choice concurrent schedule of reinforcement. Results showed that both birds reached 79.5% and 82.7% of optimal choice. Crow 1 shows undermatching, $\beta_1 = .766, p < .001$, a tendency to overestimate the reinforcement value of less rewarding stimuli and a strong preference, $\beta_0 = .201, p < .001$, for left stimuli, $R^2 = .674, p < .001$. Crow 2 shows nearly perfect matching, $\beta_1 = .946, p < .001$, subjects' choices ratio matches the probabilities ratios, and no preference, $\beta_0 = -.036, p = .130; R^2 = .596, p < .001$. These results provide compelling evidence that, not only do crows use reward probabilities associated with visual stimuli, but they minimize dependence on prior learned reinforcement rates by tracking reward fluctuations, an adaptative strategy within an unstable environment.

Keywords: Matching, crow, maximization, statistical inference.

Références

- Baum, W. M. (1974). On two types of deviation from the matching law: Bias and undermatching. *Journal of the Experimental Analysis of Behavior*, 22(1), 231-242. <https://doi.org/10.1901/jeab.1974.22-231>
- Bullock, D. H., & Bitterman, M. E. (1962). Probability-matching in the pigeon. *The American Journal of Psychology*, 75(4), 634-639. <https://doi.org/10.2307/1420288>
- Caron, P.-O. (2017). Sur la loi de l'appariement. *Psychologie Française*, 62(1), 29-55. <https://doi.org/10.1016/j.psfr.2015.10.003>
- Caron, P.-O. (2024). Treatments for undefined log ratios in matching analyses. *Journal of the Experimental Analysis of Behavior*, 122(1), 52-61. <https://doi.org/10.1002/jeab.925>
- Herrnstein, R. J. (1958). Some factors influencing behavior in a two-response situation. *Transaction of the New York Academy of Science*, 21(1), 35-45. <https://doi.org/10.1111/j.2164-0947.1958.tb00645.x>
- Jensen, G. (2019). Instrumental variable estimation of reinforcer effects. *Journal of the Experimental Analysis of Behavior*, 111(2), 359-368. <https://doi.org/10.1002/jeab.498>
- Johnston, M., Brecht, K. F., & Nieder, A. (2023). Crows flexibly apply statistical inferences based on previous experience. *Current Biology*, 33(15), 3238-3243.e3233. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2023.06.023>
- McDowell, J. J. (2013). On the theoretical and empirical status of the matching law and matching theory. *Psychological Bulletin*, 139(5), 1000-1028. <https://doi.org/10.1037/a0029924>
- Rachlin, H., Battalio, R. C., Kagel, J. H., & Green, L. (1981). Maximization theory in behavioral psychology. *The Behavioral and Brain Sciences*, 4(3), 371-388. <https://doi.org/10.1017/S0140525X00009407>
- Saldana, C., Claidière, N., Fagot, J., & Smith, K. (2022). Probability matching is not the default decision making strategy in human and non-human primates. *Scientific Reports*, 12(1), 13092. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-16983-w>
- Shimp, C. P. (1973). Probabilistic discrimination learning in the pigeon. *Journal of Experimental Psychology*, 97(3), 292-304. <https://doi.org/10.1037/h0034134>
- Vulkan, N. (2000). An economist's perspective on probability matching. *Journal of Economic Surveys*, 14(1), 110-118. <https://doi.org/10.1111/1467-6419.00106>