



HAL
open science

Human learning is guided by intuitive representations of informativeness

Olivier Mascaro

► **To cite this version:**

Olivier Mascaro. Human learning is guided by intuitive representations of informativeness. *Annales de la Fondation Fyssen*, 2023, 36, pp.121-134. hal-04194691

HAL Id: hal-04194691

<https://hal.science/hal-04194691v1>

Submitted on 4 Sep 2023

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.

L'apprentissage humain est guidé par des représentations intuitives de l'informativité

Olivier MASCARO

Chargé de Recherche CNRS, Integrative Neuroscience and Cognition Center, Université Paris Cité, CNRS, F-75006 Paris, France

Résumé

Obtenir des informations utiles est crucial pour tout système cognitif. Ce besoin peut être satisfait en évaluant l'informativité des données dans l'environnement. Cet article détaille comment des représentations de l'informativité guident l'apprentissage dès le plus jeune âge. Les enfants planifient leurs comportements d'apprentissage en anticipant les gains informationnels futurs de leurs actions. Ils interprètent les signaux communicatifs nouveaux en supposant que leurs interlocuteurs sont informatifs, et ils déterminent les besoins informationnels d'autrui en utilisant des représentations simplifiées du savoir. La capacité à évaluer l'informativité des données joue un rôle clef dans le développement cognitif et l'optimisation des apprentissages.

Mots-clés

Développement cognitif, apprentissage, communication, pragmatique

Human learning is guided by intuitive representations of informativeness

Abstract

Obtaining useful information is crucial for any cognitive system. This need can be met by evaluating the informativeness of the data present in the environment. This article details how informativeness representation guides learning from an early age. Two years old children plan their active learning behaviors by anticipating the informational gains that might result from their actions. Young children interpret novel communicative acts by assuming that their interlocutors are sufficiently informative, and they determine the informational needs of others using simplified representations of knowledge. Thus, the ability to evaluate the informativeness of data plays a central role in cognitive development. It helps children optimize their learning behaviors.

Keywords

Cognitive development, learning, communication, pragmatics

Les jeunes enfants sont des apprenants hors pair. Pourquoi sont-ils si doués pour acquérir des connaissances ? La plupart des études sur la cognition des enfants se sont concentrées sur des cas où les jeunes humains apprennent de manière passive, sur la base des données qui leurs sont fournies. Cependant, une manière plus efficace d'acquérir des connaissances consiste à rechercher activement des informations qui maximiseront l'apprentissage. Ce processus peut s'appuyer soit sur la recherche de données pertinentes nouvelles, soit sur l'extraction efficace d'information à partir de données connues.

Ainsi, les humains peuvent réfléchir à des questions qui n'ont jamais été posées auparavant et collecter des informations afin de tester différentes hypothèses de manière créative (Schulz, 2012). Ce type de recherche d'informations ne se produit pas uniquement dans l'activité scientifique. On le rencontre chaque fois qu'une personne recherche activement des données dans le but de combler les lacunes de ses connaissances, par exemple lorsqu'elle pose des questions ou fait preuve de curiosité. Tous ces comportements impliquent une capacité à anticiper quel type de stimulus est susceptible

d'être informatif. Cet article de revue détaille l'ontogénèse précoce de mécanismes permettant aux très jeunes enfants d'être sensibles à l'informativité des stimuli. Ils se focalise sur trois domaines dans lesquels la représentation de l'informativité joue un rôle crucial : l'apprentissage individuel (partie 1), l'apprentissage social (partie 2), et la transmission de connaissances (partie 3). Dans l'article, l'informativité est définie comme la capacité d'un stimulus à réduire l'incertitude sur un ensemble d'hypothèses (Frank & Goodman, 2012), l'incertitude étant quantifiée par la mesure d'entropie standard de la théorie de l'information (Shannon, 1948).

L'apprentissage individuel

La recherche d'informations utiles est l'une des fonctions les plus générales de la cognition. Ainsi, beaucoup d'espèces utilisent des comportements permettant la collecte d'information (Kidd & Hayden, 2015). Nombre de ces comportements ne s'appuient pas sur une représentation du processus d'apprentissage lui-même. Les mécanismes visant à la recherche d'information peuvent par exemple prendre la forme d'heuristiques ou de comportement fixes ayant évolué pour répondre à un manque d'informations spécifiques (Carruthers, 2018). Les comportements sophistiqués qui sous-tendent la recherche de nourriture fournissent de bons exemples de telles heuristiques. Ainsi, *C. Elegans* – un nématode qui ne possède que quelques centaines de neurones – alterne des petits déplacements concentriques locaux dans des zones restreintes, et des déplacements beaucoup plus importants en ligne droite. Ces schémas de comportements permettent d'optimiser les gains d'informations sur l'emplacement de la nourriture (Calhoun et al., 2014). Pour autant, malgré leur efficacité, il est vraisemblable que les mécanismes de recherche de nourriture de *C. Elegans* n'impliquent pas de représentation du processus d'apprentissage ou de l'informativité en tant que tel.

Former une représentation de l'informativité des données a plusieurs bénéfices pour l'apprentissage. Cette capacité permet entre autres de découvrir de manière flexible de nouvelles façons de rechercher des informations, et donc de répondre à des questions entièrement nouvelles. Pour reprendre l'exemple des nématodes, il est vraisemblable que les mécanismes de recherche de nourriture observés chez *C. Elegans* aient évolués pour répondre à un besoin informationnel extrêmement précis (localiser la nourriture), et cela dans un environnement particulier. Ces mécanismes ne permettent pas à *C. Elegans* de

poser des questions nouvelles, comme par exemple déterminer d'où vient la nourriture, ou pourquoi elle est abondante à un emplacement donné. En revanche, chez l'humain, la capacité à anticiper les conséquences épistémiques des actions permet de découvrir de manière flexible de nouvelles façons de rechercher des informations, et de tester des hypothèses (par exemple, Schulz, 2012). Se représenter le processus d'apprentissage permet d'anticiper les gains d'apprentissage potentiels résultant d'actions futures, et donc de sélectionner les comportements à même de fournir des connaissances.

Aguirre et al. (2022a) a testé l'ontogénèse précoce de cette capacité à anticiper les conséquences épistémiques des actions. Nous cherchions à déterminer si, en situation d'ignorance, les jeunes humains utilisent plutôt des heuristiques de recherche d'information fixes, ou s'ils planifient leurs comportements de manière flexible, en anticipant leurs gains informationnels futurs. Pour ces études, nous avons créé des conditions dans lesquelles les participants ignoraient quelque chose, et avons manipulé le contexte pour moduler la quantité d'information qui pouvait résulter d'une action donnée. Par conséquent, si les comportements de recherche de l'information des enfants reposent sur de simples heuristiques fixes déclenchées de manière mécanique en réponse au manque d'une information, les enfants devraient se comporter exactement de la même manière dans toutes les conditions de nos études. En revanche, si les enfants planifient leur recherche d'information en anticipant l'apprentissage pouvant résulter de leurs actions, ils devraient ajuster leurs comportements au contexte de manière flexible, en prenant en compte les gains informationnels futurs de leurs actions.

Une première étude testait la capacité des jeunes enfants de 14 mois ($N = 72$) à anticiper qu'un objet puisse être visible, et à agir avec pour

ETHOLOGIE / PSYCHOLOGIE

but de voir un objet. Les enfants du groupe « expérimental » étaient invités à récupérer une peluche cachée dans une boîte – dans les faits, la peluche était discrètement retirée de la boîte sans que les enfants ne puisse s'en apercevoir. Dans la condition transparente, les participants pouvaient voir à l'intérieur de la boîte en ouvrant un volet qui recouvrait une fenêtre transparente. La condition opaque était identique à la condition transparente, à ceci près que la fenêtre recouverte par le volet était opaque – par conséquent ouvrir le volet ne permettait pas de voir à l'intérieur de la boîte (**Fig. 1A**). Nous avons observé que dans le groupe expérimental, les enfants étaient comparativement plus rapides pour se saisir du volet dans la condition transparente que dans la condition opaque (**Fig. 1B**). Ainsi, les nourrissons anticipaient la disponibilité future de l'accès à une information visuelle, et ils calibraient leurs comportements en conséquence. Si les enfants s'étaient contentés d'utiliser un comportement exploratoire fixe, ils auraient dû se comporter de la même manière

dans les conditions opaques et transparentes. Les données suggèrent au contraire que les enfants de 14 mois planifiaient bel et bien leurs actions dans le but de voir où se trouvait l'objet qu'ils recherchaient.

Dans l'étude 1, des enfants étaient également enrôlés dans un groupe contrôle. Dans ce dernier, les enfants étaient simplement invités à manipuler la boîte, sans avoir à rechercher de jouet à l'intérieur de celle-ci. Dans ce groupe contrôle, l'effet de la condition (Transparente vs. Opaque) sur la latence pour se saisir du volet n'était plus significative (**Fig. 1B**). Ces résultats ont donc confirmé que les comportements de recherche d'information observés dans le groupe expérimental disparaissaient quand ils n'étaient plus pertinents pour les buts des jeunes enfants.

Deux autres études (les études 2 et 3 d'Aguirre et al., 2022a) ont testé la capacité des tout-petits à anticiper si certains stimuli pourraient leur être utiles d'un point de vue cognitif. Pour exemple, voir ne conduit pas systématiquement à savoir ; ainsi, la vue ne permet pas par exemple de dis-

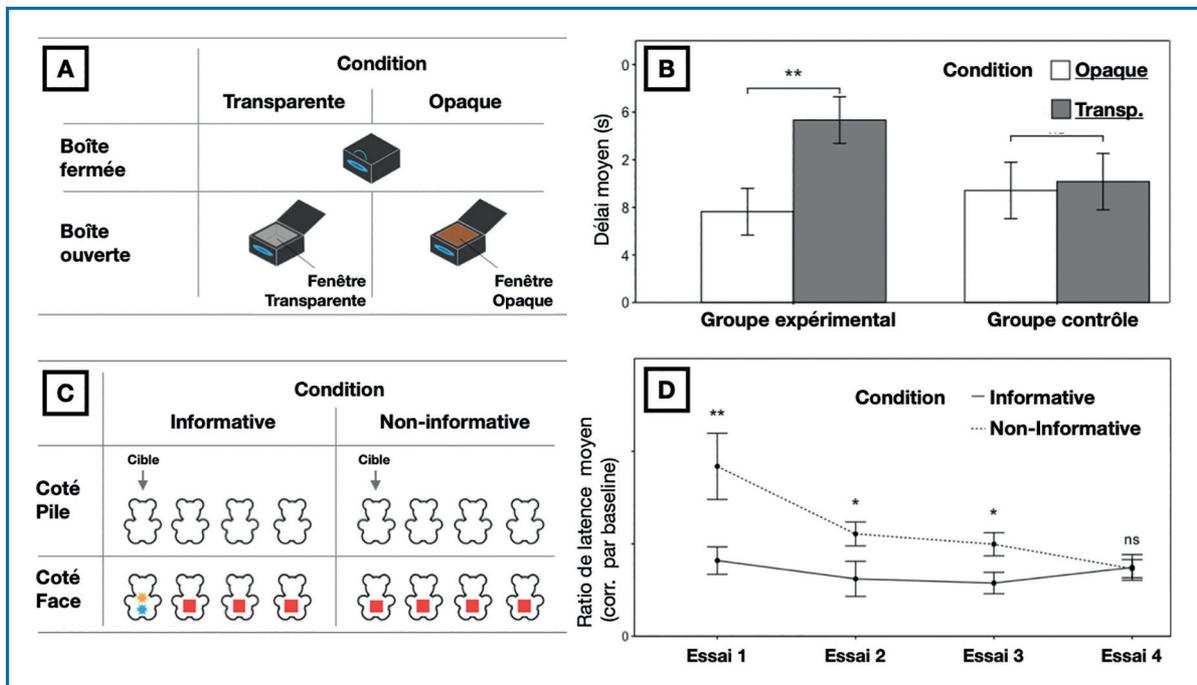


Figure 1. Panel A. Matériel de l'étude 1 de Aguirre et al., 2022a. Panel B. Délai moyen (Erreur Standard) pour se saisir de la poignée du volet dans la phase de test de l'étude 1 de Aguirre et al., 2022a, par groupe (Expérimental vs. Contrôle) et Condition (Transparente vs. Opaque). Panel C. Matériel de l'étude 2 de Aguirre et al., 2022a. Panel D : Ratio de latence moyen pour se saisir d'un premier personnage avant de retourner, corrigé par une mesure de baseline (Erreur Standard) dans la phase de test de l'étude 2 de Aguirre et al., 2022a, par Condition (Informatif vs. Non-informatif). * $p < .05$; ** $p < .01$. Figure adaptée de Aguirre et al., 2022a

criminer entre plusieurs individus dont l'apparence est identique. Des enfants de deux ans ($N = 72$) devaient localiser un personnage cible caché parmi des distracteurs. La cible et les distracteurs avaient exactement le même aspect visuel côté pile, et ils portaient des symboles côté face. Dans la condition informative (Aguirre et al., 2022a, étude 2), le symbole présent sur la cible différait de celui présent sur les distracteurs. Dans la condition non-informative, en revanche, la cible et les distracteurs portaient tous le même symbole côté face (**Fig. 1C**). Dans la tâche expérimentale, on plaçait les personnages côté pile, et on les mélangeait (ainsi l'enfant ne pouvait plus savoir où se trouvait le personnage cible). On demandait ensuite à l'enfant de retrouver la cible. On mesurait le temps de latence pour se saisir d'un personnage et le retourner. D'un point de vue informationnel, regarder le côté face des personnages n'était utile que dans la condition informative. Nous nous attendions donc à ce que le temps de latence pour se saisir d'un personnage avant de le retourner soit plus court dans la condition informative que dans la condition non-informative. C'est ce que nous avons observé, dès le premier essai (**Fig. 1D**). Par conséquent, dès l'âge de deux ans et demi, les tout-petits planifient leurs comportements de recherche d'information en anticipant l'utilité cognitive future des données obtenues.

Les résultats mis en évidence dans Aguirre et al. (2022a) ont des conséquences pour la compréhension du développement de capacités cruciales pour anticiper les gains d'apprentissage. Ces données fournissent des informations sur la capacité des jeunes enfants à se représenter des alternatives distinctes, une compétence requise pour évaluer et tester des hypothèses (Cesana-Arlotti et al., 2020 ; Goddu et al., 2021). Il a été avancé qu'avant la fin de la maternelle et l'émergence du langage modal (qui exprime la probabilité qu'une alternative soit vraie), les jeunes enfants n'auraient pas la capacité à marquer des alternatives comme de simples possibilités. En conséquence, les jeunes enfants seraient tout simplement incapables de se représenter et de tester des hypothèses (Leahy & Carey, 2020). Selon ce point de vue théorique, lorsque les données sont compatibles avec plusieurs hypothèses distinctes, les enfants de moins de 4 ans se contentent de choisir l'une d'entre elles, et se

comportent comme si cette hypothèse était vraie. L'étude 2 d'Aguirre et al. (2022a) réfute cette proposition théorique. Dans ce cas, pour pouvoir anticiper les gains informatifs résultant du fait de retourner un personnage, les enfants devaient anticiper que cette action pouvait avoir deux résultats possibles (observer un symbole, ou un autre, sur le côté face du personnage). Les enfants devaient donc se représenter deux possibilités distinctes. S'ils ne l'avaient pas fait, et s'étaient contentés de traiter comme vraie une seule de deux hypothèses concernant le symbole placé au dos du personnage, on n'aurait observé aucune différence de comportement entre les conditions.

L'apprentissage social

Les études d'Aguirre et al. (2022a) indiquent que les enfants de 2 ans sont capables d'anticiper l'informativité d'un stimulus, et utilisent cette compétence en situation d'apprentissage individuel. Cependant, la représentation de l'informativité joue également un rôle crucial en situation d'apprentissage social. La communication est une source d'information majeure chez l'être humain. Elle permet, entre autres, de s'appuyer sur les découvertes qui ont été faites par les autres – plutôt que d'avoir à tout redécouvrir individuellement (Harris, 2012 ; Sperber et al., 2010). Cependant, les actes communicatifs sont intrinsèquement ambigus ; ils peuvent porter une grande variété de sens possibles. De nombreux modèles de la communication humaine, inspirés notamment par Grice, supposent que former des attentes positives sur la valeur des informations communiquées peut aider à leur interprétation (Grice, 1975 ; Sperber & Wilson, 1986). Dans ce contexte, l'informativité joue un rôle crucial. Pour exemple, chez Grice comme dans la théorie des actes de parole rationnels, les locuteurs sont supposés interpréter ce qui leur est communiqué en s'appuyant sur des attentes d'informativité (Frank & Goodman, 2014 ; Grice, 1975).

De fait, dès l'entrée en maternelle, les enfants sont capables d'évaluer l'informativité des locuteurs (Eskritt et al., 2008 ; Gweon et al., 2018 ; Gweon & Asaba, 2018 ; Morisseau et al., 2013), et ils utilisent des attentes d'informativité pour interpréter le sens de mots nouveaux (Frank & Goodman, 2014). En d'autres termes,

ETHOLOGIE / PSYCHOLOGIE

la sensibilité à l'informativité des actes communicatifs a été observée dès la maternelle. Des études financées par la fondation Fyssen ont étudié comment ces compétences guident l'interprétation d'actes communicatifs au plus jeune âge.

Dans une première série d'études (Aguirre et al., soumis), des enfants de 2 ans ($N = 90$) devaient découvrir l'emplacement d'une récompense à l'aide d'un acte communicatif nouveau. Dans la condition "indice informatif" de l'une de ces études, les participants avaient pour tâche de localiser une récompense cachée dans une boîte parmi quatre. Des symboles étaient collés sur chacune des boîtes. Un symbole identique était collé sur trois de ces boîtes (dorénavant, le symbole répété), et un deuxième symbole était collé sur la quatrième boîte (dorénavant, le symbole unique).

L'expérimentateur donnait un indice aux enfants en montrant une carte. Cette dernière partageait une caractéristique du symbole unique – par exemple, sa forme – et une autre caractéristique du symbole répété – par exemple son motif (Fig. 2A). On contrebalançait bien sûr le type de propriété partagée par l'indice et par les symboles uniques et répétés. Dans l'étude de Aguirre et al. (soumis), l'indice était ambigu : il pouvait, en théorie, faire référence aussi bien au symbole unique qu'au symbole répété. Cependant il était possible de résoudre cette ambiguïté en supposant que le locuteur était informatif. En effet, seule l'interprétation selon laquelle l'indice faisait référence au symbole unique était suffisamment informative pour permettre à l'enfant

de découvrir la récompense. L'interprétation alternative, selon laquelle l'indice faisait référence au symbole répété, n'était pas suffisamment informative pour permettre de découvrir l'emplacement de la récompense.

Dans la condition indice informatif, les enfants ont bel et bien privilégié l'interprétation la plus informative de l'indice (Fig. 2B). En outre, afin de s'assurer que les réponses des participants étaient bel et bien informées par l'interprétation de l'indice, nous avons testé un deuxième groupe d'enfants dans une conditions dite d'« indice non pertinent ». Dans cette dernière, la carte d'indice ne contenait aucune information pertinente sur l'emplacement de la récompense. Dans la condition « indice non-pertinent », les enfants n'ont montré aucune tendance significative à sélectionner la boîte portant le symbole unique. Deux autres études confirment qu'à deux ans, les enfants privilégiaient les interprétations informatives et peu coûteuses de signaux nouveaux (Aguirre et al., soumis).

Ainsi, les résultats obtenus suggèrent qu'à partir de deux ans, le développement communicatif des jeunes enfants s'appuie sur des attentes d'informativité. Ces résultats montrent que des attentes sur la valeur des informations transmises guident l'interprétation de la communication dès le plus jeune âge. D'une certaine manière, les jeunes enfants exercent donc une pression sur les systèmes de communication – dans la mesure où ils privilégient les interprétations informatives des actes communicatifs nouveaux. Cette pression pourrait contribuer à optimiser les systèmes de communications.

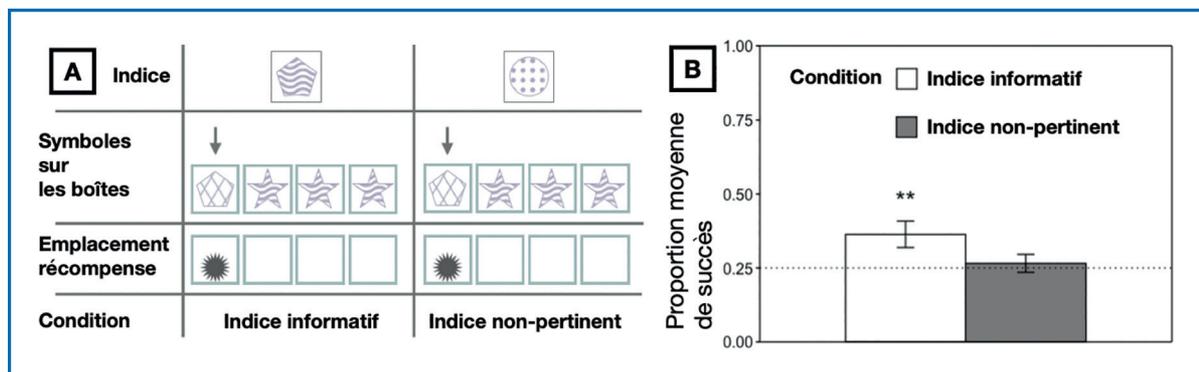


Figure 2. Panel A. Matériel de l'étude 3 de Aguirre et al., soumis. Panel B. Proportion moyenne d'essais (Erreur Standard) dans lesquels les participants localisent la récompense, par condition (Indice informatif vs. Non-pertinent). ** $p < .01$. Figure adaptée de Aguirre et al., soumis.

Enseigner et se représenter les besoins informationnels d'autrui

Transmettre des informations est un troisième domaine dans lequel être sensible à l'informativité est cruciale. Pour pouvoir transmettre des informations utiles à quelqu'un d'autre, il faut être sensible à ce qui est informatif non pas pour soi-même, mais pour autrui. De fait, on sait que les enfants de deux ans et plus sont capables de communiquer de manière informative – ils privilégient le fait d'informer leur interlocuteur de quelque chose de nouveau, plutôt que de lui communiquer une information déjà connue (Mascaro et al., 2019 ; O'Neill, 1996). Cependant, le type de mécanisme qui permet aux jeunes enfants de se représenter ce que les autres connaissent ou ignorent fait débat. Grâce au financement de la fondation Fyssen, nous avons étudié plus précisément les mécanismes qui sous-tendent la représentation humaine de la recherche d'information chez autrui. On ne peut rechercher une information que lorsque l'on réalise que celle-ci nous fait défaut. Ainsi, en principe, l'interprétation des demandes d'informations pourrait être guidée soit par des représentations de l'ignorance socratique (i.e., de ce que les gens savent qu'ils ignorent), ou par des représentations de savoir simplifiées (i.e., simplement en se représentant ce que les gens savent ou ignorent).

Nous avons évalué ces hypothèses en testant des enfants de 5 à 7 ans ($N = 72$), et des adultes ($N = 320$) (Aguirre et al., 2022). Dans nos tests un locuteur (adulte) posait une question sur l'emplacement d'un objet en utilisant un mot inconnu (« Où est le tralet ? »). La question du locuteur était ambiguë, dans la mesure où il y avait deux objets non-familiers dans la scène qui pouvaient potentiellement être désignés par le mot nouveau. Cette ambiguïté pouvait être résolue en prenant en compte l'état de connaissance du locuteur. Dans le test de premier ordre, le locuteur ignorait l'emplacement d'un seul des deux objets. Ainsi, il était possible de déterminer à quel objet le mot nouveau faisait référence en s'appuyant sur une représentation simplifiée du savoir (permettant de différencier ce que le locuteur savait de ce qu'il ne savait pas). Dans le test de second ordre, le locuteur ignorait l'emplacement des deux objets ; cependant, le locuteur avait connaissance de son ignorance pour seulement l'un des deux objets.

Pour l'autre objet, le locuteur ne savait pas qu'il était ignorant (car il n'avait pas vu que ce deuxième objet avait été déplacé ; il ne pouvait donc pas savoir qu'il ignorait où se trouvait cet objet à présent). Ainsi, dans le test de second ordre, il était possible de déterminer à quel objet le mot nouveau faisait référence seulement en utilisant des représentations d'ignorance socratique (permettant de discriminer ce qu'un individu sait qu'il ne sait pas, de ce qu'il ignore ne pas savoir). Dans tous les tests (de premier ordre et de second ordre), nous avons évalué la performance des participants en testant s'il parvenait à déterminer à quel objet le mot nouveau faisait référence. Pour cela, après que le locuteur ait posé sa question plusieurs fois, nous montrions les deux objets non-familiers côte à côte et invitons le participant à regarder celui qui correspondait au mot nouveau (« tralet »), puis nous lui demandions explicitement de nous le montrer.

Dans le test de second ordre, les enfants de cinq à sept ans n'ont montré aucune tendance à prendre en compte l'ignorance socratique du locuteur pour interpréter ses questions. Ils ont cependant obtenu de meilleurs résultats lorsque les demandes d'informations pouvaient être clarifiées à l'aide de représentations simplifiées du savoir. Les adultes étaient capables d'utiliser des représentations de l'ignorance socratique pour interpréter les questions, mais ils étaient plus confiants lorsqu'une représentation simplifiée du savoir suffisait à interpréter les demandes d'informations. De plus, dans des études complémentaires, nous avons observé que les adultes interprétaient les questions comme si les locuteurs pouvaient requérir des informations sur des choses qu'ils ignoraient, même lorsque les locuteurs n'avaient aucune raison d'avoir connaissance de leur ignorance. Ainsi, l'interprétation des demandes d'informations semble reposer principalement sur une représentation simplifiée du savoir, et non sur des représentations de l'ignorance socratique. Cette heuristique pourrait être utile à la communication car elle réduit les coûts cognitifs et les temps de traitements.

Discussion générale

Il y a différentes façons pour un système cognitif d'analyser son environnement. Un premier mode d'interprétation consiste à traiter les conséquences physiques des événements. Les

nourrissons humains adoptent très tôt ce type d'analyse lorsqu'ils forment des attentes sur les interactions entre des objets inertes, par exemple lorsqu'ils s'attendent à qu'un objet qui entre en collision avec un autre puisse le déplacer (Luo et al., 2009). Un deuxième mode d'interprétation de l'environnement consiste à le concevoir en termes données portant de l'information. Cette lecture informationnelle de l'environnement joue un rôle central dans le développement cognitif humain. La représentation de l'informativité future des stimuli guide l'apprentissage actif des enfants, en leur permettant de planifier leurs actions en vue de maximiser leurs gains d'apprentissage (Aguirre et al., 2022a). Cette capacité va bien au-delà de simples heuristiques fixes. Elle met vraisemblablement en jeu des capacités à se représenter (i) le contenu de sa propre ignorance, et (ii) les conséquences informationnelles futures de ses actions. Une lecture informationnelle de l'environnement permet également de prendre en compte le fait qu'un même stimulus puisse être exploité de manière différente selon l'interprétation qui lui est donnée, et l'état de connaissance préalable de l'individu qui le traite. Ainsi, dès deux ans, les enfants forment des attentes positives sur l'informativité des sources de communication, et utilisent ces attentes pour guider leur interprétation de stimuli communicatifs ambigus (Aguirre et al., soumis). Enfin une lecture informationnelle de l'environnement est cruciale pour interagir avec d'autres individus capables d'apprendre, notamment pour déterminer quelles informations peuvent être utiles à autrui. Les résultats de Aguirre et al. (2022b) confirment l'existence d'une capacité précoce à prendre en compte ce qui est connu par autrui pour déterminer ses besoins informationnels.

Les données passées en revue dans cet article suggèrent également que chez l'humain, la lecture informationnelle de l'environnement, bien qu'efficace, est aussi caractérisée par des limites. Ces dernières sont autant de signatures des mécanismes computationnels utilisés par le système cognitif humain pour représenter l'informativité. Ainsi, l'interprétation des requêtes

“La représentation de l'informativité future des stimuli guide l'apprentissage actif des enfants, en leur permettant de planifier leurs actions en vue de maximiser leurs gains d'apprentissage.”

d'information chez autrui est sous-tendue par des représentations simplifiées du savoir, qui semblent être utilisées non seulement par les

jeunes enfants, mais aussi par les adultes (Aguirre et al., 2022b). Dans le futur, mieux comprendre la nature de ces limites devrait permettre d'identifier de manière plus précise comment la représentation intuitive de l'information se construit et opère tout au long de la vie.

Remerciements

Un grand merci aux familles et aux collaborateurs ayant participé à ces recherches, notamment à M. Aguirre, M. Brun, A. Couderc, et A. Reboul. Ces travaux ont été financés par une subvention de recherche de la fondation Fyssen à O.M.

Références

- Aguirre, M., Brun, M., Couderc, A., Reboul, A., Senez, P., & Mascaro, O. (2022a). Knowledge in sight: Toddlers plan efficient epistemic actions by anticipating learning gains. *Cognitive Science*, 46(2), e13103.
- Aguirre, M., Brun, M., Morin, O., Reboul, A., & Mascaro, O. (soumis). Cognitive costs and benefits guide toddlers' discovery of novel cues' meanings.
- Aguirre, M., Brun, M., Reboul, A., & Mascaro, O. (2022b). How do we interpret questions? Simplified representations of knowledge guide humans' interpretation of information requests. *Cognition*, 218, 104954.
- Calhoun, A. J., Chalasani, S. H., & Sharpee, T. O. (2014). Maximally informative foraging by *Caenorhabditis elegans*. *Elife*, 3.
- Carruthers, P. (2018). Basic questions. *Mind & Language*, 33(2), 130–147.
- Cesana-Arlotti, N., Kovács, Á. M., & Téglás, E. (2020). Infants recruit logic to learn about the social world. *Nature Communications*, 11(1), 5999. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-19734-5>
- Eskritt, M., Whalen, J., & Lee, K. (2008). Preschoolers can recognize violations of the Gri-

cean maxims. *British Journal of Developmental Psychology*, 26(3), 435–443. <https://doi.org/10.1348/026151007X253260>

• Frank, M. C., & Goodman, N. D. (2012). Predicting Pragmatic Reasoning in Language Games. *Science*, 336(6084), 998–998. <https://doi.org/10.1126/science.1218633>

• Frank, M. C., & Goodman, N. D. (2014). Inferring word meanings by assuming that speakers are informative. *Cognitive Psychology*, 75, 80–96. <https://doi.org/10.1016/j.cogpsych.2014.08.002>

• Goddu, M. K., Sullivan, J. N., & Walker, C. M. (2021). Toddlers learn and flexibly apply multiple possibilities. *Child Development*, cdev.13668. <https://doi.org/10.1111/cdev.13668>

• Grice, H. P. (1975). Logic and Conversation. In P. Cole & J. L. Morgan (Eds.), *Speech Acts* (pp. 41–58). BRILL. https://doi.org/10.1163/9789004368811_003

• Gweon, H., & Asaba, M. (2018). Order Matters: Children’s Evaluation of Underinformative Teachers Depends on Context. *Child Development*, 89(3), e278–e292. <https://doi.org/10.1111/cdev.12825>

• Gweon, H., Shafto, P., & Schulz, L. (2018). Development of children’s sensitivity to overinformativeness in learning and teaching. *Developmental Psychology*, 54(11), 2113–2125. <https://doi.org/10.1037/dev0000580>

• Harris, P. L. (2012). Trusting What You’re Told: How Children Learn from Others. In *Trusting What You’re Told*. Harvard University Press. <https://doi.org/10.4159/harvard.9780674065192>

• Kidd, C., & Hayden, B. Y. (2015). The psychology and neuroscience of curiosity. *Neuron*, 88(3), 449–460.

• Leahy, B. P., & Carey, S. E. (2020). The acquisition of modal concepts. *Trends in Cognitive Sciences*, 24(1), 65–78.

• Luo, Y., Kaufman, L., & Baillargeon, R. (2009). Young infants’ reasoning about physical events involving inert and self-propelled objects. *Cognitive Psychology*, 58(4), 441–486.

• Mascaro, O., Aguirre, M., Brun, M., Couderc, A., & Mercier, H. (2019). Nonverbal rhetoric: 2-to 4-year-old children select relevant evi-

dence when trying to influence others. *Developmental Psychology*, 55(10), 2039.

• Morisseau, T., Davies, C., & Matthews, D. (2013). How do 3- and 5-year-olds respond to under- and over-informative utterances? *Journal of Pragmatics*, 59, 26–39. <https://doi.org/10.1016/j.pragma.2013.03.007>

• O’Neill, D. K. (1996). Two-Year-Old Children’s Sensitivity to a Parent’s Knowledge State When Making Requests. *Child Development*, 67(2), 659–677. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8624.1996.tb01758.x>

• Schulz, L. (2012). The origins of inquiry: Inductive inference and exploration in early childhood. *Trends in Cognitive Sciences*, 16(7), 382–389.

• Shannon, C. E. (1948). A mathematical theory of communication. *The Bell System Technical Journal*, 27(3), 379–423. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x>

• Sperber, D., Clément, F., Heintz, C., Mascaro, O., Mercier, H., Origgi, G., & Wilson, D. (2010). Epistemic vigilance. *Mind & Language*, 25(4), 359–393.

• Sperber, D., & Wilson, D. (1986). *Relevance: Communication and cognition* (Vol. 142). Harvard University Press Cambridge, MA.

Children are incredible learners. When attempting to explain young humans’ learning proficiency, most studies of children’s cognition have focused on cases in which young humans learn passively, based on data provided to them. However, a more effective way to acquire knowledge is to actively seek out information that will maximize learning, for instance by searching for relevant new data. Indeed, humans can think about questions that have never been asked before and collect information to test different hypotheses in creative ways (Schulz, 2012). This type of information seeking does not only occur in science. It is observed whenever a person actively searches for data in an effort to fill in knowledge gaps, such as when asking questions or being curious. All of these behaviors involve an ability to anticipate what type of stimulus is likely to be informative. This review article details the early ontogeny of mechanisms that enable very young children to be sensitive to the informativeness of stimuli. It focuses on three domains in which the represen-

tation of informativeness plays a crucial role: individual learning (part 1), social learning (part 2), and knowledge transmission (part 3). Throughout the article, informativeness is defined as the ability of a stimulus to reduce uncertainty about a set of hypotheses (Frank & Goodman, 2012), with uncertainty quantified by the standard information-theoretic measure of entropy (Shannon, 1948).

Individual Learning

Searching for useful information is one of the most general functions of cognition. Thus, a wide range of species use behaviors that support information gathering (Kidd & Hayden, 2015). Many of these behaviors do not involve a representation of the learning process itself. For example, mechanisms geared towards information seeking may take the form of heuristics or fixed behaviors that have evolved in response to a specific information gap (Carruthers, 2018). The sophisticated behaviors underlying foraging provide good examples of such heuristics. For example, *C. Elegans* – a nematode with only a few hundred neurons – alternates between small, local concentric movements in restricted areas, and much larger movements in straight lines. These behavioral patterns optimize the gain of information about food location (Calhoun et al., 2014). Yet, despite their efficiency, it is likely that the foraging mechanisms of *C. Elegans* do not involve a representation of the learning process or informativeness *per se*.

The capacity to represent informativeness has several benefits for learning. Among other things, this ability allows for the flexible discovery of new ways to search for information, and thus to answer entirely new questions. For instance, it is likely that the foraging mechanisms observed in *C. Elegans* have evolved to meet an extremely specific informational need (locating food), in a particular environment. These mechanisms do not allow *C. Elegans* to ask novel questions, such as where food comes from, or why it is abundant in a given location. By contrast, in humans, the ability to anticipate the epistemic consequences of actions allows for flexibly discovering new ways to search for information and test hypotheses (e.g., Schulz, 2012). Representing learning processes themselves allows individuals to anticipate potential learning gains from

future actions, and thus to select behaviors that are likely to provide knowledge.

Aguirre et al. (2022a) tested the early ontogeny of the ability to anticipate the epistemic consequences of actions. This study tested whether young humans use fixed information-seeking heuristics, or whether they plan their behaviors flexibly, anticipating their future informational gains. For these studies, we created conditions in which participants were ignorant of something, and manipulated the context to modulate the amount of information that could result from a given action. Thus, if children's information-seeking behaviors are based on simple fixed heuristics that are mechanically triggered in response to the lack of a piece of information, children should behave in exactly the same way across all conditions in our studies. In contrast, if children plan their information seeking by anticipating the learning that may result from their actions, they should adjust their behaviors to the context in a flexible manner, taking into account future informational gains from their actions.

A first study tested the ability of 14-month-olds ($N = 72$) to anticipate that an object might be visible, and to act with the goal of seeing an object. Children in the “experimental” group were asked to retrieve a stuffed animal hidden in a box – in effect, the stuffed animal was discreetly removed from the box unbeknownst to the participants. In the transparent condition, participants could see inside the box by opening a flap that covered a transparent window. The opaque condition was identical to the transparent condition, except that the window covered by the flap was opaque – therefore opening the flap did not allow seeing inside the box (**Fig. 1A**). We observed that in the experimental group, infants were comparatively faster to grasp the flap in the transparent condition than in the opaque condition (**Fig. 1B**). Thus, infants anticipated the future availability of access to visual information, and they calibrated their behaviors accordingly. If infants had simply used fixed exploratory behavior, they should have behaved similarly in the opaque and transparent conditions. Instead, the data suggest that the 14-month-olds were indeed planning their actions with the goal of seeing where the object they were looking for was located.

ETHOLOGY / PSYCHOLOGY

In Study 1, children were also enrolled in a control group. In the latter, the children were simply allowed to manipulate the box, without having to search for a toy inside it. In this control group, the effect of the condition (Transparent vs. Opaque) on latency to grasp the flap was no longer significant (**Fig. 1B**). Thus, these results confirmed that the information-seeking behaviors observed in the experimental group disappeared when they were no longer relevant to young children's goals.

Two other studies (studies 2 and 3, Aguirre et al., 2022a) tested toddlers' ability to anticipate whether a given stimuli would be cognitively useful to them. For example, seeing does not systematically lead to knowing; indeed, seeing does not allow one to discriminate between several individuals with identical appearance. Two-year-olds ($N = 72$) were asked to locate a target character hidden among distractors. The target and distractors had exactly the same visual appearance on the tails side, and they had symbols on the faces side. In the informative condition (Aguirre et al.,

2022a, Study 2), the symbol on the target differed from the symbol on the distractors. In the noninformative condition, on the other hand, the target and distractors all had the same symbol on the face side (**Fig. 1C**). In the experimental task, the characters were placed on the tails side, and mixed up (so the child could no longer tell where the target character was). The child was then asked to find the target. The latency to pick up a character and turn it over was measured. From an informational point of view, looking at the face side of the characters was only useful in the informative condition. We therefore expected that the latency to grab a character before flipping it over would be shorter in the informative condition than in the non-informative condition. This is what we observed, from the first trial on (**Fig. 1D**). Therefore, as early as two and a half years of age, toddlers plan their information-seeking behaviors by anticipating the future cognitive utility of the data obtained.

The findings highlighted in Aguirre et al. (2022a) have implications for understanding the

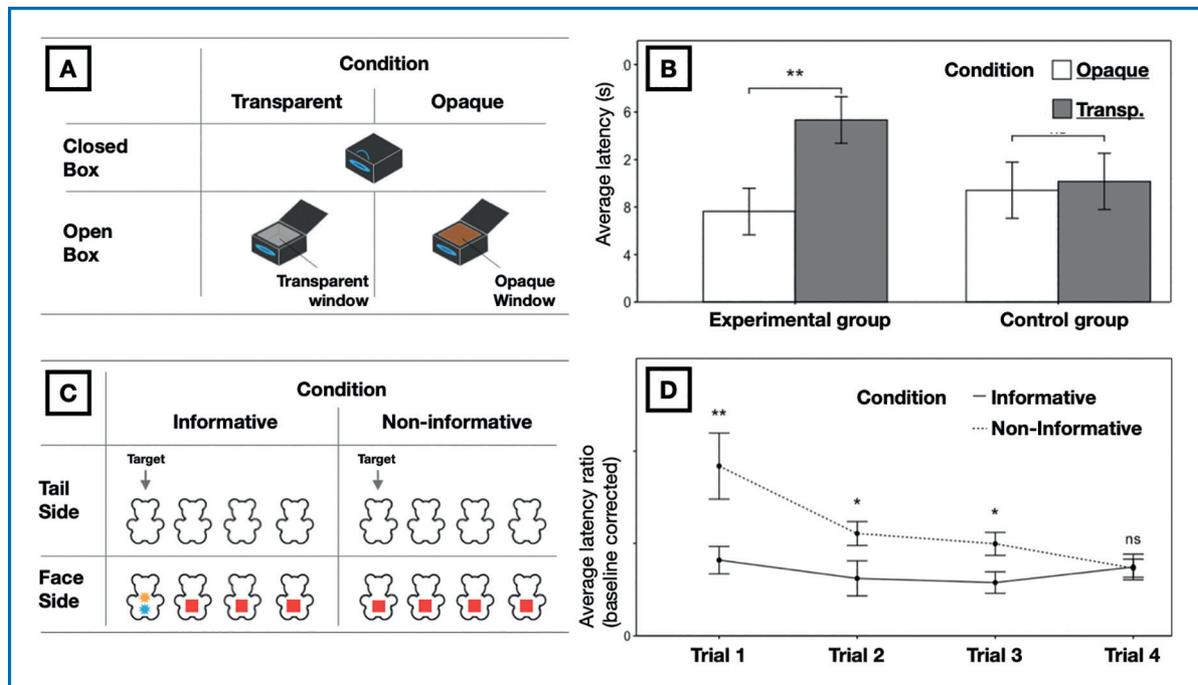


Figure 1. panel A. Material from Study 1 of Aguirre et al., 2022a. Panel B. Average delay (Standard Error) before grasping the flap handle in the test phase of Study 1 of Aguirre et al., 2022a, by group (Experimental vs. Control) and Condition (Transparent vs. Opaque). Panel C. Material from Study 2 of Aguirre et al., 2022a. Panel D: Average latency ratio to grasp a first character before flipping it, corrected by a baseline measure (Standard Error) in the test phase of Study 2 of Aguirre et al., 2022a, by Condition (Informative vs. Non-informative). * $p < .05$; ** $p < .01$. Figure adapted from Aguirre et al., 2022a

development of abilities crucial for anticipating learning gains. These data provide information about young children's ability to represent distinct alternatives, a skill required to evaluate and test hypotheses (Cesana-Arlotti et al., 2020; Goddu et al., 2021). It has been argued that prior to the end of kindergarten and the emergence of modal language (which expresses the probability that an alternative might be true), young children would not have the ability to label alternatives as mere possibilities. As a result, young children would simply be unable to represent and test hypotheses (Leahy & Carey, 2020). According to this theoretical view, when data are consistent with several distinct hypotheses, children under 4 years of age simply choose one of them, and behave as if that hypothesis were true. Study 2 by Aguirre et al. (2022a) refutes this theoretical proposition. In this case, in order to anticipate the informational gains resulting from flipping a character, children had to anticipate that this action could have two possible outcomes (observing one symbol, or another, on the face side of the character). Thus, children had to imagine two distinct possibilities. If they had not done so, and had simply treated as true only one of two hypotheses about the symbol on the back of the character, children would have behaved identically in the informative and in the non-informative conditions.

Social Learning

Studies by Aguirre et al (2022a) indicate that 2-year-olds are able to anticipate the informativeness of a stimulus, and use this skill to support their individual learning. However, representations of informativeness also play a crucial role in social learning. Communication is a cornerstone of human learning. Among other things, it allows us to capitalize on and learn from the discoveries made by others in the near and distant past – rather than having to rediscover everything individually (Harris, 2012; Sperber et al., 2010). However, communicative acts are inherently ambiguous; they can carry a wide variety of possible meanings. Many models of human communication, inspired in particular by Grice, assume that forming positive expectations about the value of communicated information can guide its interpretation (Grice, 1975; Sperber & Wilson, 1986). In this context, informativeness plays a

crucial role. For example, in Grice's account of communication as in rational speech act theory, speakers are assumed to interpret what is communicated to them based on expectations of informativeness (Frank & Goodman, 2014; Grice, 1975). Indeed, by the time children enter kindergarten, they are able to assess the informativeness of speakers (Eskritt et al., 2008; Gweon et al., 2018; Gweon & Asaba, 2018; Morisseau et al., 2013), and they use informativeness expectations to interpret the meanings of novel words (Frank & Goodman, 2014). In other words, children's sensitivity to communicative acts' informativeness has been observed as early as kindergarten. Studies funded by the Fyssen Foundation have investigated how these skills guide the interpretation of communicative acts at an earlier age, during toddlerhood.

In a first set of studies (Aguirre et al., submitted), 2-year-olds ($N = 90$) were asked to discover the location of a reward using a novel communicative act. In the "informative cue" condition of one of these studies, participants had to locate a reward hidden in one of four boxes. Symbols were glued to each of the boxes. A first symbol was glued to three of these boxes (henceforth, the repeated symbol), and a second – different – symbol was glued to the fourth box (henceforth, the unique symbol).

The experimenter gave the children a clue by showing a cue-card. This card shared one characteristic of the single symbol – for example, its shape – and another characteristic of the repeated symbol – for example, its pattern (**Fig. 2A**). The type of property shared by the cue and by the unique and repeated symbols was counterbalanced (of course). In the study by Aguirre et al. (submitted), the cue-card was ambiguous. It could, in theory, refer to the unique symbol or to the repeated symbol. However, it was possible to resolve this ambiguity by assuming that the speaker was informative. Indeed, only the interpretation positing that the cue referred to the single symbol was sufficiently informative to allow the child to discover the reward's location. The alternative interpretation – positing that the cue referred to the repeated symbol – was not sufficiently informative to allow the child to find the reward.

In the informative cue condition, children favored the more informative interpretation of

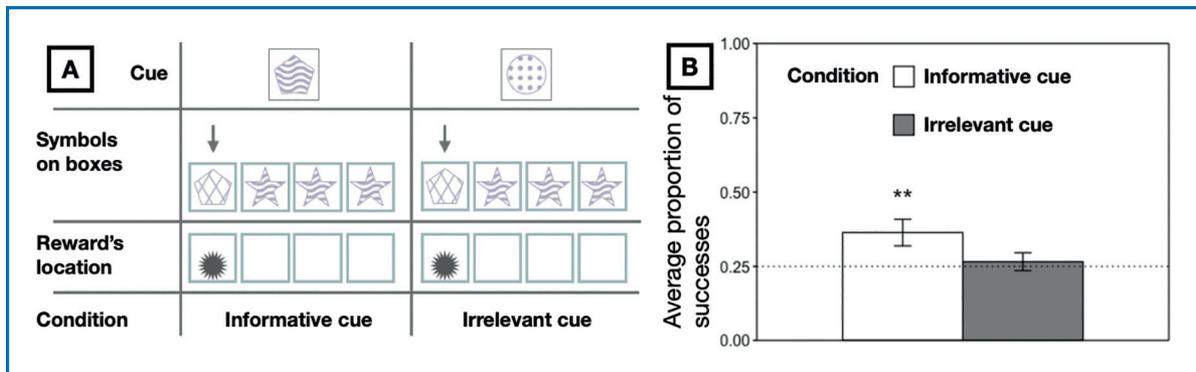


Figure 2. Panel A. Material from Study 3 of Aguirre et al. submitted. Panel B. Average proportion of trials (Standard Error) in which participants locate the reward, by condition (Informative vs. Irrelevant cue). ** $p < .01$. Figure adapted from Aguirre et al., submitted.

the cue (**Fig. 2B**). In addition, to ensure that participants' responses were indeed informed by the interpretation of the cue, we tested a second group of children in a so-called 'irrelevant cue' condition. In the latter, the cue card contained no relevant information about the location of the reward. In the 'irrelevant cue' condition, the children showed no significant tendency to select the box with the unique symbol. Two other studies confirmed that at two years of age, children favor informative and low-cost interpretations of novel cues (Aguirre et al., submitted).

Thus, data suggest that from the age of two, young children's communicative development is shaped by expectations of informativeness. These results show that expectations about the value of socially transmitted information guide the interpretation of communication from the earliest age. In a way, young children thus exert pressure on communication systems – insofar as they prioritize informative interpretations of novel communicative acts. This pressure could contribute to the optimization of communicative systems.

Teaching and Representing the Informational Needs of Others

Teaching is a third area in which being sensitive to informativeness is crucial. To be able to convey useful information to someone else, one must be sensitive to what is informative not for oneself, but for another person. In fact, it is known that two-year-olds and older are able to communicate informatively – they prioritize informing other people of something new, rather than communicating information that is already known to

their audience (Mascaro et al., 2019; O'Neill, 1996). However, there are debates about the mechanisms supporting young children's representation of what others know or do not know. Thanks to the funding from the Fyssen Foundation, we further investigated the mechanisms underlying the human representation of information seeking in others.

One can only search for information when one detects that one lacks it. Thus, in principle, the interpretation of information requests could be guided either by representations of Socratic ignorance (i.e., of what people know that they do not know), or by simplified knowledge representations (i.e., simply by representing what people know or do not know). We evaluated these hypotheses by testing children aged 5-7 ($N = 72$), and adults ($N = 320$) (Aguirre et al., 2022). In our tests an adult speaker asked a question about the location of an object using a novel label ("Where is the *tralet*?"). The speaker's question was ambiguous, in that there were two unfamiliar objects in the scene that could potentially be the referent of the novel label. This ambiguity could be resolved by taking into account the speaker's knowledge state. In the first-order test, the speaker was unaware of the location of only one of the two objects. Thus, it was possible to disambiguate the reference of the novel label simply by taking into account what the speaker knew and what she did not know (thus using a simplified representation of knowledge). In the second-order test, the speaker was unaware of the location of both unfamiliar objects; however, the speaker was aware of her ignorance for only one of the two

objects. The speaker did not know that she was ignorant about the location of the other object (she had not seen that this second object had been displaced; therefore, she could not know that she did not know where this object was when she asked her question). Thus, in the second-order test, it was possible to determine identify the referent of the novel label only by using Socratic ignorance representations (allowing one to discriminate what an individual knows that he does not know, from what he does not know that he does not know). In all tests (first-order and second-order), we evaluated the participants' performance by testing whether they appropriately identify the referent of the novel label. To this end, after the speaker asked the question several times, we showed the two unfamiliar objects side by side and we invited the participants to look at the "tralet", before asking them to show it to

us. For adults, we also asked participants to rate their confidence in their answers on a scale from 0 to 100.

The results showed that in the second-order test, children showed no tendency to take the speaker's Socratic ignorance into account when interpreting his or her questions. However, children performed better in the first order test, where requests for information could be clarified using simplified representations of knowledge. Adults were able to use representations of Socratic ignorance to interpret questions in the second-order test. Yet they were more confident in their answers in the first order test, i.e., when a simplified representation of knowledge was sufficient to interpret requests for information. Moreover, in additional studies, we observed that adults interpreted questions as if speakers could request information about things they did not know, even when the speakers had no reason to be aware of their ignorance. Thus, the interpretation of information requests seems to rely primarily on simplified representations of knowledge, rather than on representations of Socratic ignorance. This heuristic could be useful for communication because it reduces cognitive costs and processing times.

General discussion

Cognitive systems can analyze their environment in different ways. First, cognitive systems may process the physical consequences of events. Human infants adopt this stance early on, for instance when forming expectations about interactions between inert objects (Luo et al., 2009). Yet, environments need not being analysed only in physical terms. They can also be analyzed in terms of data carrying information. Such an informational reading of the environment plays a central role in human cognitive development. Representing the future informativeness of stimuli guides children's active learning, allowing them to plan their actions to maximize their learning gains (Aguirre et al.,

"Representing the future informativeness of stimuli guides children's active learning, allowing them to plan their actions to maximize their learning gains."

2022a). This ability goes well beyond simple fixed heuristics. It plausibly involves abilities to represent (i) the content of one's own igno-

rance, and (ii) the future informational consequences of one's actions. Processing information flow in one's environment is also crucial to take into account the fact that a given stimulus can be exploited in different ways depending on its interpretation. Indeed, as early as two years old, children form positive expectations about the informativeness of communication sources, and use these expectations to guide their interpretation of ambiguous communicative stimuli (Aguirre et al., submitted). Finally, tracking information flow in one's environment is crucial for interacting with other learners, especially for determining what information may be useful to others. The results of Aguirre et al. (2022b) confirm the existence of an early ability to take into account what is known by others to determine their informational needs.

The data reviewed in this article also suggest that in humans, the capacity to process informativeness, although effective, is also characterized by limitations. These limitations are signatures of the computational mechanisms used by the human cognitive system to represent informativeness. For example, the interpretation of information requests in others is underpinned by simplified representations of knowledge, which

appear to be used not only by young children, but also by adults (Aguirre et al., 2022b). Gaining a better understanding of the nature of these boundaries is crucial to understand how intuitive representations of informativeness are constructed and operate across the lifespan.

Acknowledgements

Many thanks to the families and collaborators who participated in this research, especially to M. Aguirre, M. Brun, A. Couderc, and A. Reboul. This work was funded by a research grant from the Fyssen Foundation to O.M.