



HAL
open science

Le goût du risque : approches développementale et comparative de l'attitude face au risque économique et physique

Anthony Roig

► **To cite this version:**

Anthony Roig. Le goût du risque : approches développementale et comparative de l'attitude face au risque économique et physique. Psychologie. Normandie Université, 2023. Français. NNT : 2023NORMR048 . tel-04351524

HAL Id: tel-04351524

<https://theses.hal.science/tel-04351524>

Submitted on 18 Dec 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.

THÈSE

Pour obtenir le diplôme de doctorat

Spécialité PSYCHOLOGIE

Préparée au sein de l'Université de Rouen Normandie

**Le goût du risque : approches développementale et comparative
de l'attitude face au risque économique et physique**

**Présentée et soutenue par
ANTHONY ROIG**

**Thèse soutenue le 20/10/2023
devant le jury composé de**

M. OLIVIER PASCALIS	Directeur de Recherche, UNIVERSITE GRENoble ALPES	Rapporteur du jury
M. JEAN-PIERRE THIBAUT	Professeur des Universités, UNIVERSITE DE BOURGOGNE	Rapporteur du jury
MME CHRISTELLE JOZET-ALVES	Maître de Conférences HDR, Université de Caen Normandie	Membre du jury
M. GILLES LAFARGUE	Professeur des Universités, UNIVERSITE REIMS CHAMPAGNE ARDENNE	Président du jury
M. JAMES RIVIERE	Maître de Conférences, Université de Rouen Normandie	Directeur de thèse
M. RÉGIS THOUVARECQ	Professeur des Universités, Université de Rouen Normandie	Co-directeur de thèse

Thèse dirigée par JAMES RIVIERE (CENTRE DE RECHERCHE SUR LES FONCTIONNEMENTS ET LES DYSFONCTIONNEMENTS PSYCHOLOGIQUES) et RÉGIS THOUVARECQ (CENTRE D'ETUDES DES TRANSFORMATIONS DES ACTIVITES PHYSIQUES ET SPORTIVES)

À Manon

Partie pour une autre aventure, merci pour ta gentillesse

“Novelties in the way of sensible objects, especially if their sensational quality is bright, vivid, startling, invariably arrest the attention of the young and hold it until the desire to know more about the object is assuaged.” – William

James, 1899

...

« Bah oui hein ! Le tout cuit c’est pas intelligent, moi j’essaye de faire travailler mon cerveau » - justification du choix d’un des participants de la

deuxième étude, 2022

Sommaire

Sommaire	1
Remerciements	5
Introduction générale	9
Partie 1 : Approche historique de la décision sous risque	19
1.1. <i>Le risque : un état simplifié de l'incertitude du monde</i>	20
1.2. <i>De l'espérance de gain à l'utilité</i>	23
1.1.1. L'espérance de gain	23
1.1.2. L'utilité espérée	27
1.1.3. Théorie de l'utilité espérée : théorisation axiomatique et formelle d'un décideur rationnel sous risque ...	31
1.1.4. Première remise en cause : passage de l'objectif au subjectif et du prescriptif au descriptif.	35
1.1.5. Prospect Theory et approche heuristique	39
Partie 2 : Approche de la psychologie comparative et développementale de l'attitude face au risque	47
2.1. <i>Les problèmes ultimes du risque</i>	52
2.1.1. Phylogénèse et fonction de l'attitude face au risque	52
2.2. <i>Les problèmes proximaux</i>	59
2.2.1. Ontogenèse et mécanismes de la décision sous risque chez l'enfant : comment se développe l'attitude face au risque chez l'être humain et quelles sont les causes proximales influençant son expression ?	60
2.2.1.1. La trajectoire développementale de la décision sous risque économique et physique	61
2.2.1.2. Facteurs d'influence au niveau individuel	65
Objectifs et hypothèses de la thèse	73
Partie 3 : Partie expérimentale	77
3.1. <i>Étude 1</i>	77
3.1.1. Abstract	77
3.1.2. Introduction.....	78
3.1.3. Experience 1	84
3.1.3.1. Child study	84
3.1.3.1.1. Participants.....	84
3.1.3.1.2. Apparatus and procedure.....	85
3.1.3.1.3. Coding and data analysis	89
3.1.3.1.4. Results	89
3.1.3.2. Capuchin study.....	90
3.1.3.2.1. Ethical note.....	90
3.1.3.2.2. Subjects.....	90
3.1.3.2.3. Apparatus	91
3.1.3.2.4. Procedure	92
3.1.3.2.4.1. Pre-tests.....	92
3.1.3.2.4.2. Pointing task	92
3.1.3.2.4.3. Discriminatory task.....	92
3.1.3.2.4.4. Test	93
3.1.3.2.5. Coding and analysis	96
3.1.3.2.6. Results	96
3.1.3.2.7. Discussion	96

3.1.4. Experience 2	98
3.1.4.1. Child study	98
3.1.4.1.1. Participant	98
3.1.4.1.2. Results	99
3.1.4.2. Capuchin study.....	101
3.1.4.2.1. Subjects and procedure	101
3.1.4.2.2. Results	101
3.1.4.2.3. Discussion	103
3.1.5. General discussion.....	103
3.2. <i>Étude 2</i>	109
3.2.1. Abstract	109
3.2.2. Introduction.....	110
3.2.3. Material and method.....	112
3.2.3.1. Participants	112
3.2.3.2. Apparatus and Procedure	115
3.2.3.3. Data collection, scoring and Statistical analysis.....	117
3.2.4. Results	119
3.2.4.1. Choice comparisons to chance level	119
3.2.4.2. Risk alone VS novelty analysis.....	122
3.2.4.3. Novelty risk vs non risk analysis.....	124
3.2.5. Discussion	125
3.3. <i>Étude 3</i>	130
3.3.1. Abstract	130
3.3.2. Introduction.....	131
3.3.3. Matériel et méthode	134
3.3.3.1. Participant.....	134
3.3.3.2. Behavioral tasks	134
3.3.3.2.1. Balloon Analogue Risk Task (BART)	135
3.3.3.2.2. Simulator Sickness Questionnaire (SSQ).....	135
3.3.3.2.3. Simulated Traffic Task (STT).....	136
3.3.3.2.3.1. Material	136
3.3.3.2.3.2. Procedure	137
3.3.4. Datas analysis	139
3.3.4.1. BART behavior.....	139
3.3.4.2. <i>STT</i> behavior	139
3.3.4.3. Correlation between economic and physical risk-taking.....	140
3.3.5. Résultats	140
3.3.5.1. BART performance	140
3.3.5.2. Simulated Traffic Task (<i>STT</i>) performance	143
3.3.5.2.1. Crossing ratio	143
3.3.5.2.2. Child-vehicle distance at the time of crossing	144
3.3.5.2.3. Numbers of collisions	147
3.3.5.3. Consistency of risky decisions across tasks.....	149
3.3.6. Discussion	150
3.3.7. Conclusion	155
Partie 4 : Discussion générale	156

4.1. Rappel des résultats de la thèse	156
4.2. Le self-control et l'écologie du sujet : opportunités et maîtrise de soi	162
4.3. Une curieuse histoire : Prendre des risques pour apprendre ?	169
4.4. Décisions sous risque et voyages temporels : un avenir incertain à portée de choix	177
4.5. Quand la cognition comparée rencontre la psychologie du développement : un dialogue fructueux pour l'étude de la décision sous risque.....	183
4.6. Exploration virtuelle : les jeux en réalité virtuelle comme outils d'étude de la prise de risque en situation réelle	188
Conclusion générale.....	197
Références.....	202
Résumé.....	250

Remerciements

Je souhaite adresser mes remerciements à :

*Je tiens tout d'abord à exprimer ma plus profonde gratitude à messieurs **James Rivière** et **Régis Thouvarecq**, mes directeurs de thèse avant tout, de m'avoir fait confiance afin de mener ce travail, mais aussi et surtout pour leur soutien, leurs conseils précieux et leur accompagnement tout au long de ce long fleuve, peu tranquille, qu'est le parcours de la thèse.*

***James**, ta finesse et ton expertise littéraire et méthodologique m'ont donné un cadre de travail idéal. Chaque discussion a été un élément qui m'a poussé être de plus en plus précis dans ma compréhension de ce domaine de recherche. **Régis**, ton œil aiguisé et tes remarques éclairées ont grandement contribué à la réussite de ce travail. Votre encadrement patient et compréhensif a été crucial à la coconstruction de ce travail, sur tous les plans, mais aussi au développement de mes compétences de chercheur rigoureux et créatif. Votre rigueur dans la relecture et vos commentaires perspicaces ont considérablement amélioré ce travail.*

***Christelle Jozet-Alves, Gilles Lafargue, Olivier Pascalis, Jean-Pierre Thibaut**, qui ont accepté de constituer mon jury de thèse. Le fait que vous consacriez votre temps et votre expertise à l'évaluation de mon travail est d'une très grande valeur pour moi.*

L'école doctorale 556 HSRT Homme, Sociétés, Risques, Territoire, et en particulier Catherine Godard qui orchestrent le dédale complexe qu'est le parcours du doctorant.

La région Normandie pour avoir financé et fournis un cadre administratif ce travail de thèse.

*Au Centre de primatologie de l'Université de Strasbourg et à toute l'équipe qui ont accepter d'héberger la partie primatologie de ce travail de thèse, mais également de leur accueil toujours chaleureux à l'alsacienne. Je souhaite en particulier remercier **Hélène Meunier** et **Sébastien Ballesta** de m'avoir accompagné et formé sur place, mais aussi de m'avoir accompagné.*

*À **Anthony**, ami de toujours et d'une présence infallible depuis de nombreuses années. Ton soutien indéfectible, tes précieux conseils et tes réflexions approfondies ont largement contribué à la réalisation de mon travail. Nos nombreuses déambulations intellectuelles ont non seulement enrichi mes réflexions, mais ont également façonné l'homme que je suis aujourd'hui. Merci d'être l'ami que tu es, d'être cette source constante d'inspiration et de soutien.*

*À **Antoine**, un ami exceptionnel. Ton soutien, ta contribution essentielle à la collecte de données, ainsi que ton esprit vif et ta capacité à approfondir, dans les discussions, les sujets les plus complexes, ont été d'une aide inestimable. Ta qualité intellectuelle, ta générosité et tes*

aptitudes d'orateur ont toujours su m'impressionner. Ta présence dans ma vie a été une source d'encouragement constante.

*À **Lexane**, ta richesse intellectuelle infinie, ta patience exemplaire et ton soutien immense ont été des piliers sur lesquels je peux m'appuyer pour avancer. Ta présence a su alléger mes moments de doute et magnifier mes moments de réussite, faisant de chaque journée une expérience formidable. Pour toutes ces raisons et bien d'autres, je te suis infiniment reconnaissant.*

*À **Léna et Ophélie**, deux amies formidables qui ont égayé ce parcours avec leur soutien et leur amitié sincère. Chacune à votre façon, vous avez contribué à rendre ce voyage universitaire plus intéressant et plus enrichissant.*

*À tous mes collègues de la salle des doctorants et du Centre de Recherches sur les **Fonctionnements et Dysfonctionnements Psychologiques**. Bien que je ne puisse pas vous nommer tous individuellement, de peur d'omettre quelqu'un, sachez que votre aide et votre soutien ont été d'une valeur inestimable. Votre esprit d'équipe, votre solidarité et votre volonté d'entraide ont fait de chaque journée passée à vos côtés une véritable source d'inspiration. Merci à chacun d'entre vous pour votre contribution précieuse.*

Un remerciement spécial doit être rendu aux participants humains de cette étude - enfants et parents. Sans votre participation intéressée et joyeuse, ce travail de thèse n'aurait jamais pu voir le jour. Chacun d'entre vous, sa disponibilité et sa curiosité, a donné vie à cette recherche. Je suis infiniment reconnaissant pour le temps que vous avez consacré à mes études. J'espère sincèrement que cette expérience a été aussi enrichissante pour vous qu'elle l'a été pour moi. Votre contribution a non seulement permis l'accomplissement de ce travail de thèse, mais a également apporté à la connaissance scientifique.

Enfin, un clin d'œil complice et plein de reconnaissance aux Capucins de cette étude. Des acolytes turbulents et farceurs qui ont transformé la recherche en une véritable épopée. Faiseurs de bêtises professionnels, voleurs de récompenses confirmés et destructeurs de dispositif confirmés.

Introduction générale

Qu'il s'agisse de traverser la rue lorsqu'une accalmie semble se profiler, de prendre la décision d'investir dans un actif volatil face au risque de perte financière, ou de choisir entre boire un café noir seul ou y ajouter une tartine grillée avec le risque de dépasser l'apport calorique journalier recommandé, la vie se compose d'une succession ininterrompue de décisions associées à des risques. Il s'agit d'une dynamique complexe dans laquelle nous nous engageons, consciemment ou inconsciemment, chaque jour. Chaque choix, aussi banal qu'il puisse paraître, peut entraîner des conséquences significatives pour notre avenir.

Le risque est une situation particulière de l'incertitude où, non seulement les alternatives de choix sont connues, mais aussi leurs conséquences potentielles et les probabilités associées à leur survenue (Glimcher & Fehr, 2014; Knight, 1921). Cette situation se distingue d'autres types d'incertitude tels que l'ambiguïté, qui implique un certain degré d'ignorance sur les probabilités de réalisation des événements ou l'incertitude dite « radicale » où les événements ne sont pas probabilisables (Ellsberg, 1961). La prise de décision en situation de risque chez l'adulte est un domaine largement exploré. Il apparaît fréquemment que c'est la peur de perdre qui guide nos choix (Kahneman & Tversky, 1979; Tversky & Kahneman, 1992). Ainsi, en situation de gain où nous avons l'opportunité de gagner quelque chose de plus que ce que nous possédons, nous avons tendance à être prudents car nous choisissons souvent une récompense garantie plutôt que l'obtention d'un gain plus important au risque de tout perdre. À *contrario*, en situation de perte où il est possible de perdre ce que nous possédons, nous avons tendance à adopter un

comportement plus risqué dans l'espoir d'éviter la perte. Les mécanismes sous-jacents à ces comportements sont largement étudiés. Ils incluent des facteurs sociaux, cognitifs et environnementaux (e.g., Buelow *et al.*, 2022; Chein *et al.*, 2011; Zhu *et al.*, 2021), ainsi que les mécanismes neuronaux (e.g., Canessa *et al.*, 2013). À côté d'une compréhension de plus en plus fine des comportements de prise de décision face au risque chez l'adulte, celle de son développement pendant l'enfance demeure limitée.

L'étude de la décision sous risque chez les enfants, un champ de recherche assez récent (Harbaugh *et al.*, 2002), a longtemps été considéré comme « exotique » dans le domaine de l'économie comportementale (Sutter *et al.*, 2019)¹. Cette perception s'ancrait principalement dans une perspective traditionnelle présumant l'incapacité des enfants à comprendre ou traiter les concepts complexes liés à la prise de décision sous risque. Cette présomption a contribué à limiter notre compréhension du développement de cette prise de décision chez les enfants. Or, la nécessité de comprendre comment se développent les décisions face au risque, en particulier en ce qui concerne les gains, semble cruciale. En effet, cette compréhension peut éclairer les comportements adultes, nous aider à identifier comment se développent certaines tendances comportementales ou biais cognitifs et peut avoir des implications pour la prévention des

¹ Sutter et collaborateurs (2019) rapportent qu'au début des années 2000, les éditeurs de revue manifestaient leur scepticisme à l'égard de l'étude de la décision économique chez les enfants, la qualifiant de « recherche exotique ».

comportements à risque. En outre, une compréhension plus approfondie du développement de la prise de décision sous risque offre des éclairages précieux sur notre manière de faire face à l'incertitude à différentes étapes de la vie. De telles connaissances peuvent servir de fondation à l'élaboration d'interventions éducatives ciblées.

Les résultats des études menées chez les enfants ne s'accordent guère avec les modèles de la prise de décision sous risque établis chez les adultes et les adolescents (e.g., Defoe, 2021; Schulz *et al.*, 2019). Les mécanismes généralement mis en évidence pour expliquer le comportement des adultes ne parviennent pas à rendre compte de manière satisfaisante des actions des enfants. Ainsi, à la différence des adultes, les enfants, manifestent une appétence pour le risque (Defoe *et al.*, 2015; Harbaugh *et al.*, 2002; Paulsen *et al.*, 2012; Rivière *et al.*, 2018). Or, les enfants, à l'instar des adultes et des adolescents, sont par exemple aptes à implémenter des probabilités et des valeurs dans leurs décisions risquées (Denison & Xu, 2010, 2014; Schlottmann & Anderson, 1994; Tobler & Weber, 2013; Van Leijenhorst *et al.*, 2008). L'attrait apparent des enfants pour le risque pourrait simplement refléter leur « goût du risque » inné, et pourrait être lié à leur curiosité naturelle.

La curiosité, souvent associée à un certain degré de néophilie, est définie comme une motivation intrinsèque à rechercher de nouvelles informations ou expériences afin de satisfaire une recherche de sensations ou, à l'inverse, d'apaiser le sentiment désagréable de faire face à l'incertain (Kidd & Hayden, 2015; Litman, 2007, 2008). La curiosité propre aux enfants pourrait ainsi jouer un rôle clé dans leur attrait pour le risque. En stimulant l'exploration et la recherche d'information, la curiosité pourrait inciter les enfants à prendre davantage de risques. De tels

risques, déraisonnables du point de vue d'un décideur adulte, peuvent s'avérer utiles pour leur développement et leur apprentissage (e.g., Rakow & Rahim, 2010; Schulz *et al.*, 2019; Sobel & Letourneau, 2018).

Ce « goût du risque » observé durant l'enfance peut cependant avoir des conséquences dramatiques. Ainsi, bien que moins exposés au trafic routier, les jeunes enfants représentent une part non négligeable des piétons blessés. Cette situation peut s'expliquer par une généralisation de leur tendance à prendre des risques combinée à une grande sensibilité aux éléments distrayeurs (Schwebel *et al.*, 2012) ou à une moindre capacité à évaluer correctement les dangers inhérents à ces situations due à leur manque d'expérience (Barton & Schwebel, 2007; Schwebel & Barton, 2005). Ainsi, il est crucial d'approfondir notre compréhension du développement de la prise de risque chez les enfants, non seulement pour enrichir nos connaissances théoriques, mais aussi pour développer des interventions plus efficaces visant à promouvoir la sécurité et le bien-être des enfants.

Par ailleurs, une approche qui inclut des comparaisons interspécifiques est indispensable pour une compréhension holistique du comportement de prise de risque, étant donné que différentes attitudes face au risque ont émergé au fil de l'évolution, se sculptant en réponse à l'incertitude inhérente à l'environnement de chaque espèce (e.g., De Petrillo & Rosati, 2021; Haun *et al.*, 2011; Heilbronner *et al.*, 2008). Cette diversité d'attitudes se manifeste dans l'ensemble du règne animal où l'évaluation du risque et de l'incertitude constituent un élément clé de la prise de décision face aux défis de la survie, que ce soit pour trouver de la nourriture, échapper à un prédateur ou choisir un partenaire (Real & Caraco, 1986; Stephens, 1981).

Au cours des dernières années, notre compréhension de la prise de décision sous risque chez les primates s'est considérablement approfondie, notamment chez les grands singes (e.g., Heilbronner *et al.*, 2008; Lacombe *et al.*, 2022; MacLean *et al.*, 2012) et les cercopithèques (e.g., Hayden *et al.*, 2008; Heilbronner & Hayden, 2013). Au sein de l'ordre des primates, l'expression comportementale face au risque présente une richesse et une variabilité impressionnantes (De Petrillo & Rosati, 2019, 2021). En outre, des convergences sont observées avec certains aspects de la décision sous risque chez l'espèce humaine (e.g., Nioche *et al.*, 2019, 2021). Ainsi, à l'instar des êtres humains, les macaques et les chimpanzés sont sensibles, à la fois au cadre de présentation de la décision sous risque (Krupenye *et al.*, 2015; Nioche *et al.*, 2019) et à certains des facteurs d'influence (cf. De Petrillo & Rosati, 2021 pour une revue détaillée). Bien que certaines convergences puissent parfois être observées, il est toutefois important de noter que chaque espèce exprime des comportements relatifs à un contexte évolutif, des contraintes et un contexte écologique particulier. L'ensemble de ces caractéristiques spécifiques modulent les stratégies de prise de décision et la tolérance au risque, engendrant des expressions diversifiées des mêmes stratégies en fonction du degré d'influence exercé. (Heilbronner & Hayden, 2013; Kacelnik & Bateson, 1996, 1997).

Indéniablement, les comparaisons interspécifiques apportent un éclairage significatif, nous permettant de mieux comprendre l'évolution des comportements décisionnels face au risque. Ces comparaisons peuvent ainsi révéler comment différentes attitudes face au risque se sont développées en réponse à des pressions de sélection ou des contraintes environnementales. Par exemple, dans des milieux dans lesquels les ressources sont rares ou distribuées de manière

inégale, une prise de risque accrue peut être favorisée. À l'inverse, dans des environnements plus stables, une approche plus prudente peut être privilégiée (Hills *et al.*, 2015; Kacelnik & Bateson, 1996; Real & Caraco, 1986), et ce relativement à un état actuel de ressource (Burini & Leonard, 2018; Caraco, 1980; Moran *et al.*, 2021). Ces tendances peuvent être observées, à divers degrés, indépendamment de l'espèce considérée, et leur étude peut enrichir notre compréhension des mécanismes cognitifs et évolutifs sous-jacents à la prise de décision face au risque.

Au sein d'une telle perspective, le présent travail de thèse aborde la question de la décision face au risque en adoptant deux points de vue complémentaires : celui de la psychologie du développement de l'enfant et celui de la cognition comparée entre primates humains et non-humains. L'approche développementale soulève des questions intéressantes dont beaucoup restent actuellement sans réponse. Quels mécanismes, émergeant au cours du développement, influencent la prise de décision sous risque ? Comment l'attitude face au risque change-t-elle tout au long de l'enfance ? La prise de risque est-elle liée à la curiosité inhérente aux enfants ? Enfin, comment ces connaissances peuvent-elles être utilisées pour améliorer la sécurité et le bien-être des enfants ? Cette thèse a pour objectif d'explorer ces questions et d'apporter un éclairage sur le développement de la prise de décision sous risque chez les enfants. L'examen de la prise de décision sous risque chez les primates non-humains offre, elle, une occasion unique de comprendre ces processus dans un contexte évolutif plus large. Malgré la complexité des comparaisons interspécifiques, leur potentiel pour améliorer notre compréhension des mécanismes de prise de décision sous risque est immense.

Coupler ces deux approches – développementale et comparative – offre un cadre d'étude prometteur. En effet, une telle association nous aide à comprendre comment se forment et évoluent les mécanismes de décision face au risque tout au long du développement humain, et cela, dans un contexte plus large, celui de l'évolution des espèces. Cette dualité d'approches permet d'aller au-delà des frontières traditionnelles de chaque discipline pour apporter une nouvelle perspective, plus complète et plus intégrée, de la prise de décision face au risque. En associant ces deux perspectives, le présent travail de thèse vise à améliorer notre compréhension, (i) de la manière dont les êtres humains et les autres primates évaluent et prennent des risques, (ii) de la trajectoire développementale de la prise de décision sous risque et (iii) des facteurs qui influencent ce type de décisions.

Le présent travail de thèse s'articule autour de trois axes, complémentaires, mais distincts :

- 1- L'exploration de la trajectoire développementale de la prise de décision face au risque chez les enfants humains en portant une attention particulière au lien possible avec la curiosité.
- 2- La mise en perspective de ces comportements par rapport à ceux des primates non-humains. Cet axe vise à situer les comportements humains dans un cadre plus large et évolutif afin d'identifier et de questionner les similarités et/ou les différences, notamment en ce qui concerne les facteurs d'influence.

- 3- L'analyse, chez les enfants humains, des similitudes et des divergences entre les attitudes face au risque dans le domaine économique et dans le domaine physique, spécifiquement dans le contexte de la traversée piétonne.

Ce travail de thèse suit le plan suivant :

La **partie 1** a pour objectif de mieux cerner les notions de risque et de décision sous risque. Nous abordons ces notions à travers une approche historique des modèles décisionnels en économie. Nous commençons par présenter l'établissement sémantique et les théorisations princeps de la décision face à l'incertitude et au risque. Nous présentons ensuite des modèles décisionnels, prescriptifs, développés et proposés en économie, et leur remise en question par des approches issues de la psychologie, conduisant au développement de modèles plus descriptifs du comportement humain. Nous nous appuyons sur ces bases théoriques pour aborder, dans la partie 2, l'attitude face au risque, exprimée chez les enfants humains et les primates non-humains.

La **partie 2** est dévolue aux approches développementale et comparative. Nous adoptons le cadre proposé par l'éthologue Nikolaas Tinbergen (1963), ancré dans l'éthologie, qui suggère d'explorer les causes à la fois proximales et ultimes de l'expression des comportements. Ce cadre permet d'envisager l'attitude face au risque à travers ces différents prismes, fournissant une solide base pour l'étude de la prise de décision sous risque. Notre exploration de l'attitude face au risque s'articule autour de deux axes. D'une part, nous examinons la phylogénèse, les

pressions évolutives et les avantages adaptatifs de la décision sous risque. D'autre part, nous analysons le développement de la prise de décision face au risque chez l'enfant, mettant en lumière les facteurs et mécanismes sous-jacent à la prise de risque. Nous explorons d'abord la prise de décision face au risque chez les primates non humains. Puis, nous analysons le développement de cette capacité chez les enfants humains. Ces études croisées permettent d'accroître notre compréhension de la manière dont l'espèce humaine et d'autres espèces de primates font face au risque.

La **partie 3** est composée des articles produits durant ce travail doctoral. Ces articles représentent le cœur de notre recherche. Chacun d'entre eux explore un aspect spécifique des axes de recherche présentés précédemment. Voici une brève présentation de chacun d'eux :

- 1- Le premier article propose une étude comparative entre des enfants humains âgés de 2 ans et demi et des singes capucins. L'objectif de cette étude est d'explorer la décision sous risque dans le domaine économique, en observant plus spécifiquement l'influence de la présence de nouveauté sur la prise de décision. Impliquant des espèces présentant des différences de degré de néophilie et d'attrait pour le risque, cette approche comparative permet de mieux comprendre les mécanismes décisionnels face au risque.
- 2- Le deuxième article porte sur la prise de décision sous risque de gain chez les enfants âgés de 7 à 9 ans. Cette étude approfondit notre compréhension de la trajectoire développementale de la prise de décision sous risque et observe comment elle évolue avec

l'âge chez l'espèce humaine. En lien avec premier article, cet article teste également l'hypothèse d'une connexion entre la prise de risque et la curiosité.

- 3- Le troisième et dernier article examine la prise de décision face au risque dans des contextes différents. Il associe un jeu économique et une tâche impliquant un risque physique qui partagent la même structure de gains et de conséquences (*i.e.*, des pertes non compensables). Dans ce cadre, nous utilisons un simulateur de traversée pédestre dans lequel les intervalles entre les voitures et leur nouveauté varient, ainsi qu'un jeu économique.

La partie finale de cette thèse, la **partie 4**, est consacrée à l'analyse et à la discussion des résultats obtenus dans le cadre de nos recherches. Elle comprend un résumé détaillé de nos principaux résultats, de leur analyse et des hypothèses que ces derniers soulèvent. Nous présentons ensuite la contribution de notre méthodologie de recherche, reposant sur une approche à la fois développementale et comparative. Puis, nous soulignons l'importance de l'usage de simulations pour étudier les décisions prises face au risque. Tout au long de cette discussion, nous analysons les implications théoriques et pratiques de nos résultats, ainsi que leurs limites. En conclusion, nous soulignons les contributions majeures de cette thèse, avançons quelques pistes de réflexion pour les recherches futures au sein de notre champ d'étude.

Partie 1 : Approche historique de la décision sous risque

D'abord pensée comme une locution utile à la réduction du caractère incertain du monde, théorisée par les économistes et remise en question par les psychologues, la notion de risque est présente dans toutes les sciences qui abordent la décision. Classiquement, (i) le risque est défini comme l'association des conséquences d'un évènement ou une action avec leurs probabilités d'occurrence, (ii) le niveau de risque est défini comme la variabilité de ces probabilités et (iii) la décision sous risque est définie comme le fait de faire un choix parmi plusieurs options associée à des probabilité de réalisation différentes (e.g., Von Neumann & Morgenstern, 1944; Weber *et al.*, 2004). Définir le risque et étudier la décision sous risque peuvent tout de même relever du supplice de tantale face à la pluralité des approches et des définitions qui lui sont associées. Face à cela, nous proposons à l'instar d'autre auteurs (e.g., Bernstein, 1998; Piron, 2004; Pradier, 2006), d'appréhender cette notion au travers d'une approche historique, depuis les origines supposées de la diffusion du terme dans le bassin méditerranéen, jusqu'aux modèles théoriques développés en sciences comportementales. Nous procédons ainsi car nous pensons que la compréhension de cette notion implique celle de sa diffusion sémantique épistémique. A cette fin, La première sous-partie privilégiera l'approche étymologique caractérisant le terme de risque comme un état de nature simplifié soulignant son intérêt pour la prise de décision humaine face à l'incertain. La seconde sous-partie abordera la notion de risque sous l'angle des premières théorisations mathématiques et économiques. Enfin, la troisième sous-partie présentera les critiques formulées à l'encontre des modèles théoriques de la décision sous risque.

1.1. Le risque : un état simplifié de l'incertitude du monde

Une part importante de la vie quotidienne de l'être humain est gouvernée par l'incertitude. En effet, la certitude concernant l'avenir et les conséquences de nos actions n'est jamais garantie. Il nous est impossible d'entrevoir précisément la probabilité de faire face à un évènement fâcheux en sortant de chez soi, ou au contraire de faire une belle rencontre. Dans un tel environnement, il peut s'avérer inconfortable de prendre des décisions ou d'agir (Ellsberg, 1961). D'où, peut-être, la nécessité pour l'être humain d'inventer un terme permettant de cerner cette incertitude et éventuellement de la simplifier afin de pouvoir mesurer les conséquences de ses décisions (Knight, 1921).

Dans son chapitre d'ouvrage, *L'apparition du *resicum* en Méditerranée occidentale, XII^e-XIII^e siècles*, Sylvain Piron (2004), présente l'hypothèse selon laquelle la notion de risque est antérieure au bas Moyen-Âge. Elle aurait presque toujours été associée au hasard ou l'aléatoire, mais pas précisément au danger ou au péril. Au XII^e siècle (plus précisément en 1156) apparaît en Italie un néologisme restreint au vocabulaire du droit maritime et commercial : *resicum* ou *resicum* emprunté de l'arabe رزق *Rizq*² (Bencheikh, 2002). Ce mot est souvent retrouvé en

² Qui renvoie au fait d'acquérir des biens par l'action de la providence.

association à *periculum* (ce qui est périlleux) et à *fortuna*³. Le mot risque reflète ainsi la possibilité de se confronter à une destinée joyeuse ou funeste, dans un horizon incertain. Dans son usage, le terme *rescum* a été prioritairement associé à la personne en charge ou assumant la situation hasardeuse, qu'elle soit périlleuse ou heureuse. Dans les contrats de transport de marchandises sont mentionnés le « risque en mer » et « la bonne arrivée ». Ces termes déterminent la responsabilité financière du donneur d'ordre en fonction des aléas liés au transport des marchandises. Ici, le risque renvoie à une certaine mesure de l'anticipation de l'aléatoire. Mais aussi au fait que la personne physique ou morale qui fait face au risque doit décider en fonction de cette situation aléatoire. La notion de risque s'élargira progressivement à d'autres domaines. Elle constitue un outil sémantique, permettant d'évaluer et d'agir face à l'incertain, mais aussi de partager les responsabilités et/ou les richesses.

Plusieurs siècles après, le premier dictionnaire de l'académie française présente la notion de risque, comme une *façon de parler* renvoyant au fait de « ... [s'exposer] à ses risques, périls et fortunes... » (Académie française, 1694). Cette définition apparaît comme le noyau sémantique à la base de toutes les acceptions modernes du terme risque⁴. Elle illustre la dualité intrinsèque du risque, au travers des notions de péril et de fortune. À l'instar de l'usage de *rescum*, ici le

³ Selon Piron (2004) *fortuna* est une notion ambivalente vue comme : « la force aveugle qui distribue au hasard bonheurs et malheurs » (p 62). Son association à *rescum* « suffit à signaler que *rescum* n'exprime pas, de soi, une situation particulièrement périlleuse » (p 63).

⁴ Par exemple, la norme ISO 31000, décrivant les composants essentiels au management du risque, définit le risque comme l'effet de l'incertitude sur des objectifs. Dans ce cadre, le risque est une situation où les objectifs peuvent être modifiés sous le poids de l'incertain.

risque est encadré par des termes (*i.e.*, le péril et la fortune) qui précise les conséquences de l'action sous celui-ci. Cette sémantique du risque renvoie à l'action ou à la décision, à l'attribution de la charge du risque, mais également au champ des possibles qui doit être connu de la personne qui décide de s'exposer. Formulée en termes actuels, la notion de risque présuppose qu'un agent décideur qui s'expose au risque anticipe le potentiel de réalisation des événements et agit en connaissance de cause. Il s'agit alors d'anticiper les conséquences hasardeuses, qu'elles soient positives ou négatives, et de mesurer leur ampleur.

D'un point de vue fondamental, le risque présente deux dimensions. La première est de l'ordre de l'action avec un individu agissant nécessairement face au risque. La seconde est de l'ordre de l'attribution, avec un individu quantifiant le hasard d'une situation et assumant que son action comporte l'éventualité de ne pas aboutir. En d'autres termes, le risque est un outil permettant de tenter de quantifier la part de *chance*⁵ ou de hasard lié à une action qu'une personne assume. Ici, l'incertain devient quantifiable et le hasard borné.

Le signifiant *risque* apporte alors *a minima* un moyen de simplifier la réflexion sur l'incertain et sur les actions à mener lorsque l'on doit y faire face. Cela ouvre la possibilité pour un acteur d'évaluer les conséquences de ses actes afin de décider s'il s'engage ou non dans une action ou une décision.

⁵ Le terme *chance* est issu du bas-latin *cadentia* et qui donnera chance, désigne le résultat d'un jet de dés. C'est un terme qui permettra la diffusion du terme risque aux domaines du jeu.

Nous venons de le voir précédemment : le risque est une notion qui s'est construite au travers de la simplification d'un état de la nature – l'incertitude – dont les paramètres ont été rendus mesurables. Il s'agit d'un état de nature caractéristique où un être doit connaître l'étendue de l'incertain afin d'agir en toute connaissance de cause. Dans ce cadre, les répercussions de l'action entreprise peuvent être positives, au travers de gains (ou prime de risque) ou bien négatives, au travers de pertes (ou de manque à gagner). Ici, le risque est défini comme une situation dans laquelle les possibilités concernant le futur sont connues et où il est possible de définir des probabilités (Knight, 1921). Cela permet de « *s'engager dans une action qui pourrait apporter un avantage, mais qui comporte l'éventualité d'un danger* » (Larousse, 2022). Le risque, en effet, est indissociable de l'action (Magne, 2010). Décider en situation de risque impose par nature un jugement éclairé basé sur des critères permettant une mesure de l'incertain, ceci afin d'évaluer justement les conséquences desdites actions. Mais sur quelles bases un tel jugement est-il établi ? Sur quelles mesures et sur quels critères un individu se base-t-il pour décider de s'exposer ou non à un risque ?

1.2. De l'espérance de gain à l'utilité

1.1.1. L'espérance de gain

Notion permettant de simplifier l'incertain, le risque a permis de faire naître les premiers modèles de la décision face à une situation probabiliste. En effet, puisque le risque est une situation à charge du décideur qui doit assumer un coût relatif aux conséquences, celui-ci doit

pouvoir définir s'il s'y engage ou non. Pour ce faire, il doit donc pondérer les résultats de ses actions et anticiper les aléas éventuels. Afin de prendre une décision éclairée, il est nécessaire qu'il prenne en compte les critères pertinents, examine les différentes options disponibles, évalue les conséquences (c'est-à-dire les gains ou les pertes possibles) et estime leur probabilité d'occurrence. En d'autres termes, il doit avoir une connaissance de son champ des possibles pour évaluer le risque.

C'est aux alentours du XVII^e et du XVIII^e siècles, dans les théorisations mathématiques du hasard et des probabilités dans le domaine du jeu, que la question de l'établissement de cette mesure de l'incertitude trouvera une première formulation. L'origine de l'évaluation de l'incertitude, mais aussi de la modélisation de la prise de décision face à une situation risquée, réside dans l'établissement des premières théories mathématiques⁶ du *jeu*, du *hasard* ou de la *mesure du sort* (Bernoulli, 1954; Stearns, 2000).

C'est grâce à la plume de Blaise Pascal, que naît la première notion essentielle pour évaluer les responsabilités et les conséquences de l'engagement d'une personne face au hasard (*i.e.*, face à un risque). Dans une lettre datée du 29 juillet 1654, adressée à Pierre Fermat, Blaise Pascal effectue une démonstration mathématique résolvant le problème des parties tel qu'il a été énoncé par le chevalier de Méré (Boite 1).

⁶ Au XVII^e siècle la notion de hasard se détache du sacré et devient *de facto* un objet que les mathématiciens peuvent aborder et manipuler.

Boite 1. Le problème du chevalier de Méré :

« Deux joueurs sont convenus de jouer à un jeu de hasard en trois parties gagnantes et ont pour cela misé chacun 32 pistoles. Mais le jeu doit être interrompu avant la fin. Comment doivent-ils se partager les 64 pistoles ? »

Partant du principe que cette situation correspond un jeu de « *hasard pur* » et équitable, Pascal explique que les joueurs ont au départ les mêmes chances de gagner et que les gains de l'un sont les strictes pertes de l'autre. Dans le cas de la survenue d'un évènement inattendu rompant le cours du jeu. Si un joueur **A**, par exemple, gagne deux parties et que son adversaire **B** n'en gagne qu'une et le jeu s'arrête, deux finalités sont possibles. Soit **A** gagne une nouvelle fois et remporte la totalité de la mise, soit **B** égalise et il serait juste que chaque joueur récupère sa mise. Dans les termes de Pascal, le joueur **A** peut *espérer* récupérer au moins sa mise initiale ou même le double, tandis que le joueur **B** ne peut *espérer* récupérer que sa mise initiale ou ne repartir avec rien. La répartition la plus juste suit alors la logique suivante :

Soit E_A , l'espoir des gains du joueur **A** et E_B celui du joueur **B** :

$$E_A = \frac{1}{2} \times 64 + \frac{1}{2} \times 32 = \frac{64}{2} + \frac{32}{2} = \frac{96}{2} = 48 \text{ et } E_B = \frac{1}{2} \times 32 = \frac{32}{2} = 16.$$

Ainsi, la juste répartition des gains est, pour chaque joueur, le produit des gains et de la chance. Ils sont donc en droit d'attendre du hasard la somme ainsi calculée qu'il convient de leur verser si la partie s'arrête.

Le raisonnement soulevé par le problème des partis tient au fait que l'avenir est incertain et que les gains d'un joueur ne peuvent être prévus avec certitude. Ce que permet la résolution de ce problème est à la fois simple et élégant : calculer un critère décisionnel sur lequel un joueur peut baser son acceptation à s'engager dans un jeu de hasard, ainsi que la répartition juste des

gains en cas d'arrêt. Selon Pascal, l'indicateur de « *ce que le hasard leur en peut donner* » est, en effet, calculable pour chacun des joueurs. Il s'agit de l'espérance mathématique des gains⁷. En cas d'un nombre de parties non dénombrable celle-ci se formule en ces termes :

$$E_x = \sum x_n p_n$$

L'espérance des gains (ou plus largement d'une valeur qui peut ne pas être monétaire) d'un joueur E_x est la somme \sum des gains x pour chaque partie n multipliée par leur probabilité d'obtention p_n . Bien que le concept de Pascal puisse permettre d'appréhender la décision face au hasard, il ne permet pas de rendre compte du comportement du joueur. Selon Pascal, tant que le hasard permet au joueur d'espérer une certaine valeur attendue, il devrait jouer afin de maximiser cette espérance, peu importe quelle est sa mise initiale. Par exemple, si un joueur achète un jeu de grattage qui offre une espérance de gain de 210€ une fois sur deux, il serait logique pour lui de renoncer à une fortune sûre de 50€.

Cependant, il convient de noter que Pascal ne tient pas compte des considérations de contexte ou de situation financière individuelle. Que ferait un joueur si la somme de 50€ est la seule somme d'argent qu'il possède ?

⁷ Bien que Pascal ne parle jamais de probabilité ou d'espérance

1.1.2. L'utilité espérée

Une transition graduelle au sujet de l'incertitude permettra de quitter le domaine des jeux et contribuera à mettre en évidence le fait que l'espérance de gain n'est pas toujours un bon indicateur de l'engagement d'une personne dans une situation risquée. En appliquant strictement le raisonnement de Blaise Pascal, on peut penser qu'un joueur raisonnablement doué de calcul ne s'engagera que dans des situations où son espérance de gain est maximale. Toutefois, poser son jugement sur la base l'espérance de gain peut devenir paradoxal dès lors que l'on croise la route du *bon sens* (Bernoulli, 1985). Ce paradoxe trouve une élégante illustration à travers les travaux de Nicolas et de Daniel Bernoulli (Bernoulli, 1985; Peterson, 2019) sur la résolution du célèbre *Paradoxe de Saint-Pétersbourg*. Daniel Bernoulli est ainsi considéré comme le premier auteur à avoir proposé une théorie sur le comportement humain face au risque

Dans une lettre datée du 9 septembre 1713 et adressée Pierre Rémond de Montmort, Nicolas Bernoulli propose le problème suivant. Deux joueurs **A** et **B** jouent à un jeu de dés à six faces. Voici la règle de ce jeu : **A** rémunère **B** s'il fait un six, faute de quoi le jeu continue avec la progression des gains suivante : 1,2,4,8,16, etc... Bernoulli demande à Montmort s'il peut calculer l'espérance des gains du joueur **B**. Ce dernier trouve alors une espérance infinie. Le mathématicien Cramer (Bernoulli, 1985, pp. 70–71) remplacera les dés par un simple jeu de pile ou face afin de rendre plus claire le calcul de Montmort. En appliquant la formulation de l'espérance des gains de Blaise Pascale le paradoxe devient celui-ci :

$$E_B = 1 \times \frac{1}{2} + 2 \times \frac{1}{4} + 4 \times \frac{1}{8} + \dots + 2^{n-1} \times \frac{1}{2^n} = \sum_{n=1}^{+\infty} \frac{1}{2^n} \times 2^{n-1} = \infty$$

Soit 1 à la probabilité $\frac{1}{2}$ au premier lancé, 2 à $\frac{1}{4}$ au second et ainsi de suite, ce qui donne, selon la loi des grands nombres, un nombre potentiellement infini de parties et en conséquence une espérance maximale de gain infinie. À la question : « Quelle somme seriez-vous prêt à miser pour jouer à ce jeu pour qu'il soit équitable ? », une réponse rationnelle émanant d'une personne cherchant à maximiser son espérance de gain serait de miser une infinité d'argent puisque le jeu a une probabilité de ne pas se terminer. Cependant, bien que l'espérance de gain permette de prédire un « *sort espéré* » infini, le « *bon sens* » interdit de miser une telle somme parce qu'il n'est « *personne pour l'estimer à ce prix ou même à un prix bien plus médiocre* » et bien que « *le prix estimé à partir de la chose elle-même [soit] le même pour tous, l'utilité dépend de la condition de chacun* » (Bernoulli, 1985). Ainsi, bien qu'il soit possible de gagner une infinité de revenus, la situation présentée est paradoxale car très peu probable. Bernoulli suggère qu'une personne, au quotidien, ne base pas son raisonnement sur l'espérance de l'argent mais fait une estimation relative à l'usage qu'elle pourra en faire une fois qu'elle l'aura obtenu. Ainsi, l'argent (ou tout autre gain) se voit attribuer une valeur *subjective* (*i.e.*, qu'est-ce que je peux en faire) afin de décider de s'engager ou non dans une situation à l'issue incertaine. Cette mesure, appelée au jourd'hui *utilité* est logiquement associée à la satisfaction du décideur. Elle permet, entre autres, d'établir le prix qu'un individu serait prêt à assumer pour faire face à un risque. Imaginons une personne dépensant 50 €, soit le montant de toutes ses économies, pour acheter un jeu de

grattage offrant la possibilité de gagner une fois sur deux la somme de 210 €. Cette personne en rencontre une autre qui lui propose 70 € pour racheter son jeu de grattage. Devrait-elle accepter ? Non selon Pascal, car cela ne serait pas rationnel au regard du calcul de l'espérance de gain qui est toujours plus élevée pour le jeu. Ici le joueur court le risque de, soit rester sans revenus, soit d'être trois fois plus riche que la proposition de rachat. Ainsi, il semble qu'il serait sensé d'accepter l'offre proposée.

Afin de rendre compte de l'acceptation d'une telle offre de rachat, Bernoulli, considère le fait que les décideurs ne tendent pas à maximiser *l'espérance de gain* mais à maximiser une transformation de celle-ci, appelée *l'utilité espérée* de ces gains (Bernoulli, 1985). *L'utilité* est dépendante à la fois de la valeur et de l'état initial de la fortune d'un individu appelée souvent ω . Ainsi, en termes plus mathématiques, le joueur est face au choix suivant :

$$\text{Choix sûr : } u(70 + \omega) \text{ et Choix risqué : } \frac{u(210+\omega)+u(\omega)}{2}$$

Pour trancher entre les deux options, il faut donc savoir ce qui est le plus avantageux entre l'utilité du choix sûr et celle du choix risqué qui correspond à la moyenne de l'utilité des options proposées. Bernoulli propose que la relation entre *l'utilité* et la fortune d'un joueur suive une progression logarithmique concave. L'avantage que retirera un joueur sera inversement proportionnel au cumul des gains. Et même pour un même gain supplémentaire identique, deux individus à la richesse différente ne seront pas satisfaits à la même hauteur. Ainsi, pour décider entre le gain sûr et celui qui est probable, une transformation subjective de la valeur (*i.e.*, utilité) et surtout l'état de richesse du décideur revêtent une importance capitale. Et ce relativement

aux probabilités de réalisation associée aux conséquences du choix risqué. La proposition de Bernoulli est la suivante : un décideur raisonnable cherchera à maximiser *l'utilité espérée* de son choix, selon une *loi de diminution de l'utilité marginale*. Cette loi est représentée à l'aide d'une courbe concave, traduisant le fait qu'une valeur qui double n'est pas doublement satisfaisante. Parallèlement à cela, Bernoulli suggère que les joueurs envisagent dans leurs choix les préjudices possibles (e.g., l'éventualité de rester pauvre dans l'exemple mentionné ci-dessus). Le choix est donc opéré par rapport aux conséquences qu'il engendre. Cette courbe concave traduit alors un comportement dit d'*aversion au risque* (e.g., Von Neumann & Morgenstern, 1944). Bien que cela ne soit pas formulé en ces termes par Bernoulli, celui-ci suggère toutefois l'idée selon laquelle un décideur pense à «*éviter les aléas* » pour ne pas «*commettre l'imprudence des risques* » en engageant sa fortune (Bernoulli, 1985). En fait, motivé par *l'espérance de l'utilité*, ce décideur espère réaliser des gains proportionnellement à la probabilité de leur obtention.

Outre le calcul d'un premier critère décisionnel en situation risquée et les premières pierres posées à la théorie de la décision sous risque, la théorie de Bernoulli permet d'étendre le raisonnement concernant les jeux de hasard au domaine économique. Ainsi, sa démonstration est illustrée par des exemples au sujet des jeux, mais aussi et surtout, des assurances ou bien du transport de marchandises. En ce sens, la prise en compte *l'utilité espérée* dans les choix probabilistes est une pierre angulaire dans l'établissement des modèles normatifs de la décision sous risque. Toutefois, si Bernoulli permet de mettre en place une première théorie de la décision sous risque, il n'explique pas comment un individu transforme subjectivement la valeur d'une option (i.e., la forme de la courbe d'utilité d'un décideur).

1.1.3. Théorie de l'utilité espérée : théorisation axiomatique et formelle d'un décideur rationnel sous risque

La définition actuelle du risque est établie par l'économiste Frank Knight en 1921 dans son ouvrage *Risk, Uncertainty and Profit*. Ce dernier définit le risque comme un contexte décisionnel où les différentes possibilités du futur sont connues et probabilisables (cf. le jeu du pile ou face). Un contexte qu'il oppose à l'incertitude une situation où le décideur n'a pas accès à suffisamment d'informations sur les probabilités de survenue d'un événement ou des différents résultats possibles (Keynes, 1921; Knight, 1921). En d'autres termes, la prise de décision sous risque consiste à choisir parmi un ensemble d'options dont les probabilités associées à chaque résultat possible sont connues par le décideur.

Bien que Knight ait été le premier à proposer une définition du risque moderne et opérationnelle, à la fois en économie et en psychologie (Knight, 1921; Rakow & Rahim, 2010), la contribution majeure aux théories actuelles de la décision sous risque est principalement attribuée à John Von Neumann et Oskar Morgenstern (VNM). Dans leur ouvrage *Theory of Games and Economic Behavior* publié en 1944, les auteurs développent un modèle axiomatique du comportement hypothétique d'un décideur face à une situation risquée en se basant sur le principe d'utilité énoncé par Daniel Bernoulli. Ils généralisent la notion d'utilité espérée à la microéconomie de la prise de décision sous risque, par le biais de la Théorie de l'Utilité Espérée (TUE), afin d'en modéliser les facteurs déterminants. Dans ce cadre, les décideurs cherchent à maximiser leur utilité espérée en situation de risque, et cela en fonction de leurs préférences.

À l'instar de Bernoulli, Von Neumann et Morgenstern, considèrent que toutes les options d'une situation, risquée ou non, sont évaluées en fonction de leur utilité espérée. Cette mesure de la satisfaction de l'option pondérée par sa probabilité d'obtention sert ainsi d'indicateur guidant les choix. Prenons le cas d'une décision sous risque impliquant des scénarios aux résultats probabilistes tels que des *loteries*. Dans ce cas, l'utilité espérée est calculée en multipliant l'utilité de chacune des conséquences possibles de la loterie par sa probabilité respective (Bernoulli, 1985; Glimcher & Fehr, 2014; Von Neumann & Morgenstern, 1944). Ainsi, un décideur choisira entre deux loteries en calculant la moyenne pondérée de l'utilité de leurs conséquences, moyenne pondérée par leur probabilité respective. Dans sa théorisation de l'utilité marginale, Bernoulli ne précise pas comment les individus transforment la valeur d'un bien ou d'un service en utilité, ni comment celle-ci constitue un critère de décision rationnelle (Schoemaker, 1982, p. 531; Von Neumann & Morgenstern, 1944). Afin de combler ces lacunes, Von Neumann et Morgenstern, proposent des principes ou axiomes, que les preneurs de décision ***devraient hypothétiquement*** suivre afin de réaliser des choix qualifiés de rationnels lors de décision sous risque. L'originalité de cette approche réside dans le fait qu'elle prend à revers la notion d'utilité de Bernoulli en proposant que les décideurs établissent l'utilité pour chaque option d'un choix risqué en fonction de leurs préférences, lesquelles sont déterminées par la probabilité de chaque conséquence. Le comportement d'un agent décideur est ainsi établi par ses préférences quant à la distribution des probabilités des conséquences de ses choix ou actions. Ce qui lui permet de déterminer l'utilité de chaque option s'offrant à lui. Dans ce cadre théorique, l'utilité est représentée par une fonction d'utilité ordinaire, qui permet de représenter les préférences des

décideurs pour les options probabilistes disponibles et de les classer en fonction de celles-ci. Dans cette approche, les agents prennent leurs décisions en fonction d'un classement de leurs préférences, permis par les axiomes. Ceux-ci agissent comme s'ils cherchaient à maximiser l'utilité attendue de leurs choix. Autrement dit, une utilité plus élevée correspond à une préférence plus élevée et, par conséquent, conduit à la sélection de l'option jugée la plus satisfaisante.

Le cadre conceptuel de la *TUE* fournit un modèle puissant permettant de modéliser les attitudes des décideurs, à conditions que les axiomes soient vérifiés (Schoemaker, 1982). Il permet d'identifier trois types d'attitudes : l'aversion, l'appétence et la neutralité face au risque.

Avant de définir ces attitudes, et pour des raisons de clarté, il convient de développer la notion d'équivalent certain. Il s'agit de la somme de biens ou de services qu'un décideur peut choisir d'accepter de manière sûre afin d'éviter de faire face à une situation risquée. Cette somme a une valeur d'utilité égale à l'espérance de gain de la situation risquée. Cette notion sert également à rendre compte des préférences d'un décideur car son acceptation ou son refus permettent de déterminer l'attitude de celui-ci envers les situations risquées.

L'aversion pour le risque est l'attitude observée de la part d'un agent qui évite la sélection d'une option risquée ou qui préfère une option moins risquée. Dans la théorie de Von Neumann et Morgenstern, cette aversion au risque est prédite lorsque le preneur de décision préfère choisir un équivalent certain plutôt qu'une option risquée. En règle générale, la fonction d'utilité espérée d'un tel décideur est concave (**Fig. 1A**), ce qui exprime le fait que le décideur est prêt à

sacrifier le bonus d'utilité que pourrait apporter un gain incertain pour une option moins satisfaisante mais certaine.

La neutralité face au risque est l'attitude observée lorsqu'un agent prend une décision qui maximise son utilité espérée indépendamment de la variance autour de l'obtention des gains. Du point de vue du décideur, sélectionner une loterie ou son équivalent certain est considéré comme ayant la même valeur. Ici, la forme de la fonction d'utilité est linéaire, ce qui exprime le fait que la satisfaction attribuée aux options disponibles est proportionnelle à la valeur réelle des biens obtenus (Fig. **1B**).

L'appétence pour le risque est l'attitude observée de la part d'un agent qui privilégie la sélection d'une option risquée ou qui la préfère. Dans la théorie de Von Neumann et Morgenstern, cette appétence au risque est prédite lorsqu'un preneur de décision préfère choisir une option risquée à un équivalent certain. En règle générale, la fonction d'utilité espérée d'un tel décideur est convexe (Fig. **1C**), ce qui exprime le fait que le décideur attribue une satisfaction croissante à mesure que la richesse augmente, même si cela implique de plus grandes pertes par rapport à l'équivalent certain.

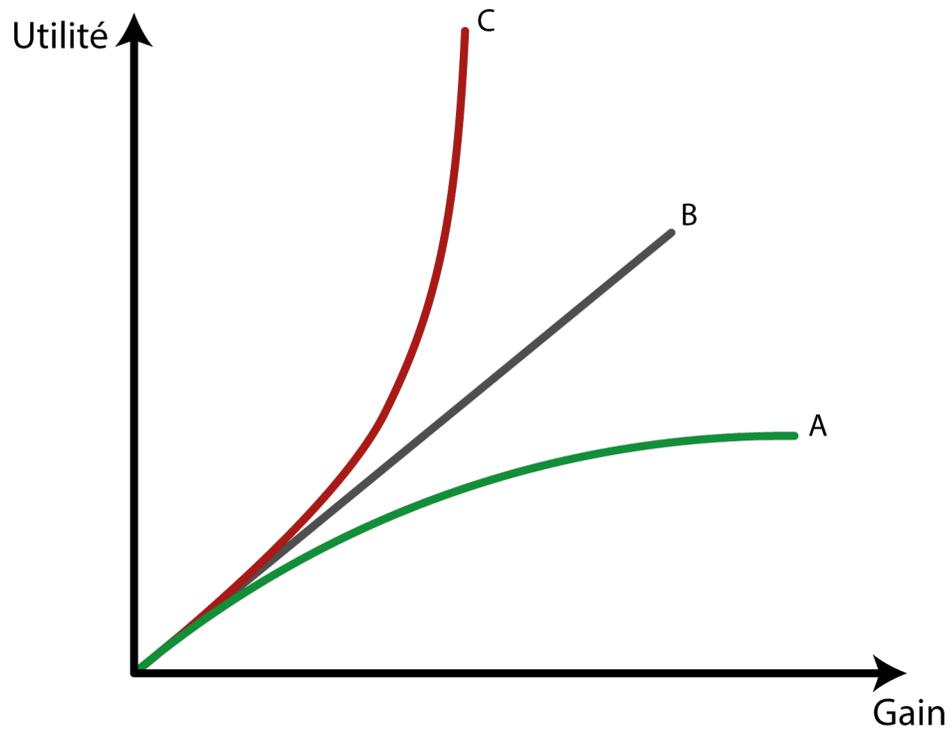


Figure 1 : Représentation des différents « goûts » du risque. A) aversion au risque, un individu préférera sacrifier un bonus d'utilité pour obtenir un gain certain, B) Neutralité au risque, un individu attribue une valeur d'utilité égale à la valeur réelle, C) appétence au risque, un individu préférera sacrifier un gain sûr pour obtenir un bonus d'utilité

1.1.4. Première remise en cause : passage de l'objectif au subjectif et du prescriptif au descriptif.

La théorie de l'utilité espérée élaborée par Von Neumann et Morgenstern a permis de construire un modèle normatif et prédictif de la décision sous risque en étendant le modèle de

l'*Homo œconomicus*⁸ à ces situations. Des critiques ont cependant émergé, soulignant le fait que, dans la vie quotidienne, un être humain ne suit que très rarement les canons de la rationalité proposés par la *TUE*. Il convient de souligner que Knight avait lui-même exprimé une certaine perplexité quant à la pertinence de l'approche économique réductionniste pour modéliser de manière exhaustive les comportements réels de l'être humain adulte (Knight, 1925a, 1925b). Il avait insisté en particulier sur les faits suivants : (i) nous ne pouvons pas avoir une compréhension complète de l'univers qui nous entoure, (ii) les sentiments tels que la satisfaction sont toujours sujettes à l'interprétation et indissociables du contexte. Il plaidait ainsi en faveur de l'intégration de l'environnement, par exemple social de l'être humain, de même que son vécu dans l'instant présent et passé⁹. La *TUE* suppose que pour être considérés comme rationnels, les êtres humains doivent tenir compte de toutes les informations disponibles sur les conséquences de leurs actions, ainsi que des probabilités de réalisation de chaque résultat possible. L'individu jugé rationnel doit ensuite établir un ordre de préférence et choisir la meilleure option (*i.e.* celle qui apportera le maximum de valeur utile). En l'absence de savoirs complets sur le monde et les

⁸L'*homo œconomicus* est un modèle théorique en sciences économiques qui représente un individu parfaitement rationnel et informé, capable d'évaluer toutes les options disponibles et de prendre des décisions en maximisant son utilité ou son profit, sans tenir compte des considérations contextuelle, émotionnelles ou encore sociales.

⁹Knight adopte une vision biologique du comportement en expliquant que les sentiment d'un organisme qui exécute une action sont toujours en connexion avec ses « habitudes comportementales » (Knight, 1925b). Critique du béhaviorisme, Knight considère que l'approche purement comportementale doit être complétée avec la prise en compte de l'environnement de l'être humain et l'implication des processus de haut niveaux (Copeland, 1925).

probabilités, il est donc impossible d'être un décideur rationnel dans un tel cadre théorique. En outre, cela suppose que deux personnes agissant dans la même situation et disposant des mêmes informations possèdent les mêmes préférences. Selon Léonard Savage, une telle description ne correspond pas, même approximativement, à la réalité (Savage, 1954, p. 7). La majeure partie du temps, les êtres humains se servent de leurs savoirs ou de leurs croyances sur le monde pour prendre des décisions et en prédire les conséquences. Les probabilités de réalisation des événements sont alors établies *a priori* et mises à jour en les comparant aux résultats obtenus (Bar-Hillel, 2001). C'est la raison pour laquelle Savage propose d'inclure dans le modèle de Von Neumann et Morgenstern la notion de *probabilité subjective*. Cela qui permet de conserver le principe d'*utilité espérée* mais cette fois-ci *subjective* (SUE). L'auteur suggère que les règles de décision sous risque (*i.e.*, *les axiomes*) impliquent une part de subjectivité chez le décideur, un degré de croyances (Gigerenzer, 2002; Savage, 1954, p. 30). Celui-ci pondérerait les résultats possibles des situations incertaines en fonction de ses croyances sur les probabilités de leur réalisation. (Abdellaoui & Wakker, 2020; Savage, 1954; Siegel & Wagner, 2022). L'introduction d'un système concernant les probabilités de réalisation d'un événement, permet au décideur de « calculer » un ordre de préférence envers des événements ponctuels ou inattendus. Cela permet également d'introduire les notions de perte, de dommage ou encore de préférences personnelles dans le raisonnement d'un individu à propos du risque. Le modèle de Savage maintient le raisonnement hypothético-déductif de la TUE, de même que sa nature prescriptive. Ici, les agents décideurs sont toujours motivés par la maximisation de l'utilité, bien que celle-ci devienne subjective, et agissent toujours relativement aux axiomes. La théorie de l'Utilité Espérée

Subjective, étends mais ne remet pas en cause le fond théorique de la théorie de Von Neumann et Morgenstern (*i.e.* TUE). Elle ne répond pas non plus aux interrogations émises face à celle-ci. Ce qui fait à la fois la force et la faiblesse du modèle, révisé ou non, c'est que celui-ci ne gravite qu'autour du seul principe d'utilité espérée¹⁰, conséquence du respect des axiomes. Si ces axiomes ne sont pas respectés, cela entraînerait inévitablement une erreur de jugement quant à la valeur de l'utilité, conduisant ainsi à une erreur de raisonnement et, en fin de compte, à une mauvaise décision. Cependant, il ne va pas nécessairement de soi que le respect des axiomes soit une preuve de rationalité (e.g., Allais, 1953; Kahneman & Tversky, 1979; Tversky & Kahneman, 1974). Parfois, il est nécessaire de transgresser ces axiomes pour que le choix soit réellement rationnel (Gigerenzer & Todd, 2012). Au travers de l'un des paradoxes les plus célèbres en économie, *le paradoxe de Allais*, l'économiste français Maurice Allais montrera que même les individus les plus informés s'écartent souvent des canons de la rationalité (Allais, 1953). Il met en évidence, par une démonstration aussi élégante que provoquante, la violation de l'axiome de l'indépendance dans la théorie de l'utilité espérée. Cet axiome stipule que la préférence d'un individu entre deux options ne doit pas dépendre de l'ajout d'une troisième option ou par des changements dans les conséquences communes aux deux options (Savage, 1954; Von Neumann & Morgenstern, 1944).

¹⁰ Certains auteurs jugent ce fait insupportable. Maurice Allais considère que procéder ainsi «revient à négliger la distribution de probabilité des valeurs psychologiques autour de leur moyenne», un élément central lorsqu'il s'agit de théoriser le risque et l'attitude face à cette situation (Allais, 1989).

En 1952 à Paris, se déroule une conférence internationale organisée par le CNRS, durant laquelle la TUE est exposée et discutée. Maurice Allais y présente sa théorie ainsi que ses critiques formulées à l'encontre de l'école américaine concernant la décision incertaine. Pendant cette conférence, il fait passer un questionnaire sur des décisions à prendre concernant des loteries (Mongin, 2014).

Ce questionnaire est rempli par les membres de l'assemblée, dont Savage lui-même, les résultats obtenus enfreignent l'axiome de l'indépendance ! Bien que Léonard Savage reconnaisse, en 1954, avoir personnellement manifesté le biais mis en évidence par Allais, la théorie de l'utilité espérée a connu un très grand succès.

1.1.5. Prospect Theory et approche heuristique

Du point de vue de la logique des modèles prescriptifs, l'être humain va à l'encontre de ses propres « intérêts » lorsqu'il fait face à une décision risquée. Bien que ces modèles puissent être puissants et logiques, il semble que « *La vie soit un piège pour les logiciens. Elle apparaît juste un peu plus mathématique et régulière qu'elle ne l'est [en réalité]* » (Chesterton, 1908). En effet, il serait réducteur de limiter l'étude de la prise de décision sous risque à la simple analogie d'un décideur théorique lançant des dés. Elle implique de prendre en compte de multiples facteurs tels que les coûts, les avantages, les contraintes et les préférences personnelles auxquels sont soumis les décideurs (Kahneman & Tversky, 1979; Tversky & Kahneman, 1992). Ainsi, les ressources cognitives de ces derniers étant limitées, intégrer la totalité des informations en présence pour effectuer une décision s'avère irréaliste (Todd & Gigerenzer, 2003). Selon Simon

(1957, 1990), l'être humain fait preuve d'une rationalité dite limitée. Contraint, dans son jugement et sa décision par une pression temporelle, un déficit d'informations, des biais cognitifs ainsi que des croyances, l'individu adopte des règles décisionnelles simplifiant la prise de décision (Gigerenzer *et al.*, 1999; Gigerenzer & Todd, 2012; Goldstein & Gigerenzer, 2002; Kahneman & Tversky, 1979; Todd & Gigerenzer, 2003).

C'est la raison pour laquelle les individus prennent rarement les décisions prévues par les modèles théoriques décrits précédemment (Allais, 1953; Kahneman & Tversky, 1979). En effet, ils ne maximisent pas toujours leur utilité espérée et réagissent différemment pour des risques de même ampleur (Kahneman *et al.*, 1979; Ruggeri *et al.*, 2020; Tversky & Kahneman, 1992). L'élaboration de modèles théoriques concurrents pour rendre compte de leurs comportements et de leurs attitudes s'avère donc nécessaire (Tversky & Kahneman, 1981, 1986). Vingt-cinq ans après la mise en évidence de la transgression de l'axiome d'indépendance, Daniel Kahneman et Amos Tversky, deux psychologues et économistes, publient en 1979 dans la revue *Econometrica* un article intitulé *Prospect theory : An analysis of decision under risk*.

La *Prospect Theory* (ci-après PT) et sa version révisée *Cumulative Prospect Theory* (Tversky & Kahneman, 1992), modélisent le comportement réel des décideurs face au risque. Selon ces théories, la prise de décision face à des perspectives risquées se décompose en une première phase d'édition et de cadrage et une seconde phase dite d'évaluation (Kahneman & Tversky, 1979; Tversky & Kahneman, 1981, 1986), lesquelles reposent sur trois concepts clés : (i) la dépendance en un point de référence, (ii) le recours à une pondération subjective des probabilités et (iii) l'effet de réflexion.

L'effet de réflexion est associé à une *fonction de valeur à la forme concave pour les gains et convexe pour les pertes*. Cela traduit (i) l'existence d'une *aversion aux pertes* d'une manière générale et l'inversion des attitudes face au risque en fonction du contexte. Plus précisément, l'être humain adulte, sous l'effet de l'aversion aux pertes, présente, en effet, un rejet des situations risquées en situation de gain et une approche des situations risquées en situation de perte.

Concernant les différentes phases de la prise de décision face à des perspectives risquées, dans la première phase d'édition, le décideur analyse l'ensemble des perspectives qui s'offrent à lui relativement au cadre, c'est-à-dire au contexte de la prise de décision. Il en effectue la réorganisation au travers de divers processus tels que la combinaison, la séparation ou la suppression (cf. Kahneman & Tversky, 1979, pp. 274–276). En outre, le décideur perçoit les perspectives, les actions, les conséquences et leurs chances de réalisations en fonction de la manière et du contexte de présentation du problème, mais aussi des normes sociales, de ses habitudes et de ses attentes. Au cours de cette première phase d'édition, la perspective présentée est codée en termes de gain ou de perte¹¹. Ce codage gain/perte de la perspective se fait relativement à un *point de référence*, qui correspond le plus souvent à l'état initial des richesses (Tversky & Kahneman, 1981). En résumé, cette phase d'édition permet à un individu de

¹¹ Kahneman et Tversky, précisent qu'à la différence des postulat de la TUE, les individus perçoivent les conséquences des perspectives présentées comme des gains ou des pertes, plutôt que comme des état finaux ou globaux des richesse ou de bien-être (Kahneman & Tversky, 1979, p. 274).

cerner, « d'éditer » la situation risquée à laquelle il fait face, en fonction du cadre de présentation de celle-ci, mais aussi en fonction de sa subjectivité. Cette première phase permet de simplifier l'évaluation et *de facto* le choix (Tversky & Kahneman, 1981, 1986).

Au cours de la seconde phase dite d'évaluation, le décideur établit un ordre de préférence des perspectives. Celle qui présentera la plus haute valeur d'utilité subjective attendue, selon le principe de maximisation, sera sélectionnée. Toutefois, l'attitude ou plutôt **les attitudes** du décideur ne sont pas modélisées par une seule fonction d'utilité, mais par un calcul reposant sur une *fonction de valeur subjective* (*i.e.* déduite de observations, Fig. 2) en forme de **S** et sur une *fonction de pondération des probabilités* (Fig. 3) (Kahneman & Tversky, 1979; Tversky & Kahneman, 1992). Ainsi, les individus codent les situations appréhendées en termes de gain ou de perte relativement à un point de référence (Fig. 2). La valeur subjective (*i.e.*, la satisfaction ou l'insatisfaction) accordée aux résultats et aux actions dépend de la direction dans laquelle le changement se produit par rapport à ce point de référence. Cette fonction est en forme de S. Elle est concave pour le domaine des gains et convexe pour celui des pertes. Il est important de noter que la courbure de cette forme sinusoïdale dans le domaine des pertes est plus importante que celle observée dans le domaine des gains. La particularité de la forme de cette fonction implique, d'une part, une attitude différentielle en fonction du domaine du risque (situation de gain versus situation de perte) et, d'autre part, l'existence d'une aversion à la perte. En effet, les individus adultes ont tendance à choisir un gain certain plutôt qu'un gain probable de même valeur (*i.e.*, aversion au risque), et à choisir une perte probable plutôt qu'une perte garantie (*i.e.* appétence

au risque). En outre, ils sont généralement davantage insatisfaits d'une perte que satisfaits d'un gain de même magnitude.

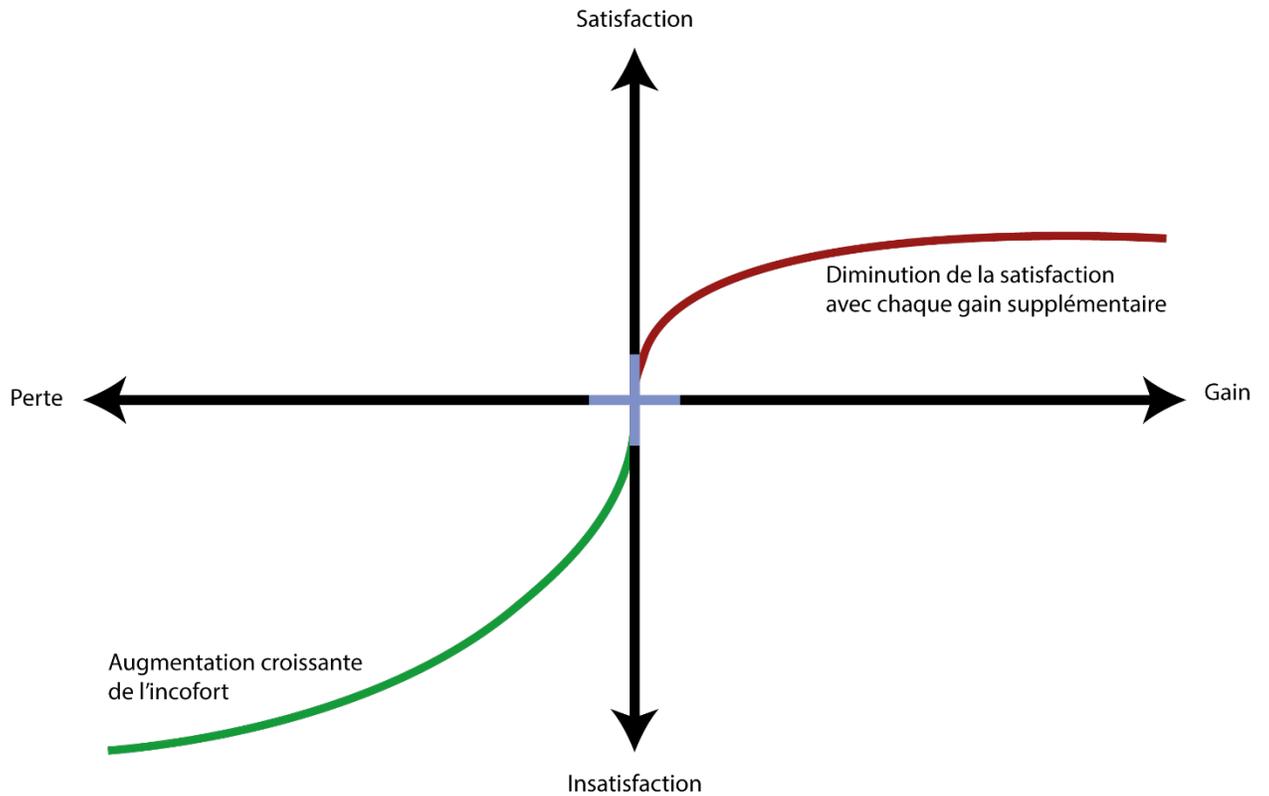


Figure 2 : **Fonction de valeur subjective.** L'axe des ordonnées correspond à l'utilité c'est-à-dire à la satisfaction ou l'insatisfaction ressentie de la part du décideur : la valeur subjective des gains et des pertes. L'axe des abscisses correspond à la valeur réelle des option présentées soit en gain soit en perte. L'origine des axes, en bleu, représente le point de référence. La courbe rouge concave traduit une aversion au risque et la courbe verte convexe une appétence au risque. Adapté de Kahneman & Tversky, 1979

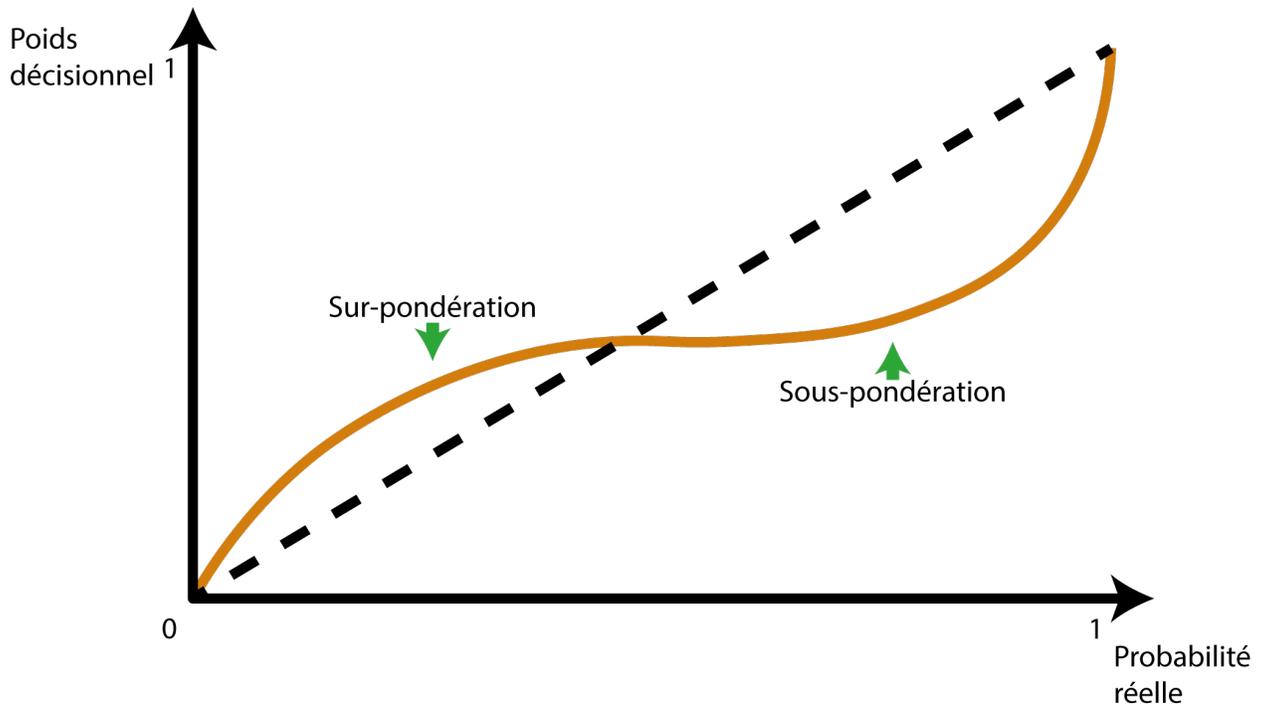


Figure 3 : **Fonction de pondération des probabilités.** L'axe des ordonnées représente le poids décisionnel : la probabilité telle que perçue par le décideur. L'axe des abscisses représente les probabilités réelles. La droite en pointillée représente une attitude non soumise à une perception subjective des probabilités. La courbe sinusoïdale orange représente le poids décisionnel observé pour chaque probabilité : sa décision d'accepter ou de rejeter l'option probabiliste présentée. Les individus acceptent davantage les petites probabilités et rejettent plus les grandes, comparativement à un décideur rationnel. Adapté de Tversky & Kahneman, 1992

Selon Kahneman et Tversky, outre la fonction de valeur subjective, les décideurs attribuent un poids décisionnel à la valeur de chaque résultat. En termes mathématiques, à chaque résultat d'une perspective, est attribué un poids correspondant à une distorsion subjective de la probabilité de survenue de ce résultat de telle sorte que les faibles probabilités sont surpondérées et les fortes sous-pondérées. En d'autres termes, à un événement rare ou peu probable est assigné un poids décisionnel plus grand et à un événement fréquent ou ayant de grande chances de survenue est attribué une sous-pondération (Kahneman & Tversky, 1979; Tversky & Kahneman, 1992). Ainsi, une personne qui surestime la probabilité d'un événement

rare peut être davantage disposée à prendre des risques pour éviter cet événement. À l'inverse, si elle sous-estime la probabilité d'un événement fréquent, elle peut ne pas prendre les précautions nécessaires pour éviter celui-ci.

En résumé, la confrontation des modèles théoriques classiques de la prise de décision sous risque avec les observations issues du monde réel, a conduit à l'élaboration de paradigmes incluant le fait que les individus ne tiennent généralement compte ni de l'ensemble des informations disponibles ni de leur caractère objectif. Selon Gerd Gigerenzer et collaborateurs (1999), les individus utilisent des heuristiques, c'est-à-dire des règles décisionnelles leur permettant d'émettre un jugement, une décision et une action plus simplement dans leur vie quotidienne. Ces heuristiques conduisent souvent à des décisions suboptimales qui enfreignent les canons de la rationalité. Mais elles demeurent acceptables dans la mesure où elles permettent aux individus de faire face aux contraintes de la réalité et de prendre des décisions rapidement et efficacement (Gigerenzer & Todd, 2012). La *Prospect Theory* considère que les attitudes des décideurs face au risque sont soumises à la fois à l'environnement de la décision et à de multiples autres contraintes s'exerçant sur l'individu en situation de prise de décision sous risque (*e.g.*, pression temporelle, manque de ressources cognitives pour rassembler les informations nécessaires ou calculer les probabilités, les croyances concernant les conséquences de ses choix ou bien une attribution de valeur variable d'un décideur à l'autre). Allant parfois à l'encontre de ses propres intérêts économiques ou physiques, l'individu fait des choix qui s'inscrivent dans son environnement. Des décisions irrationnelles sur le plan économique ou logique peuvent alors s'avérer rationnelles sur le plan écologique (Gigerenzer & Todd, 2012).

Outre les facteurs internes tels que les limitations cognitives ou les préférences individuelles, l'être humain est également contraint par la structure de son environnement (Simon, 1955, 1990). Des règles décisionnelles lui permettent d'outrepasser ces limitations, en l'aidant, par exemple, à sélectionner l'élément le plus saillant de son environnement afin de prendre une décision rapidement (cf. Gigerenzer & Goldstein, 1996). Bien que ces comportements puissent être qualifiés d'irrationnels sur le plan économique, ils trouvent néanmoins une justification dans la mesure où le recours à des règles de décisions plus simples conduit à l'économie cognitive et donc à minimiser les efforts engagés dans une action ou un choix. Et ce, quitte à sacrifier des ressources ou le succès d'une action engagée. Au cours de leur histoire évolutive, les êtres humains se sont retrouvés dotés de telles heuristiques car elles s'avèrent souvent efficaces dans la prise de décision dans des situations complexes ou incertaines et peuvent conduire à des résultats acceptables et adaptatifs.

Partie 2 : Approche de la psychologie comparative et développementale de l'attitude face au risque

Dans la première partie, nous avons présenté les théories abordant les attitudes face au risque à travers une approche historique. Bien que ces théories aient pu mettre en évidence certains déterminants intrinsèques et extrinsèques de ces attitudes, elles restent cantonnées à l'être humain adulte. Elles laissent donc *de facto* sans réponses des questions telles que : (i) l'attitude face au risque et ses déterminants sont-ils variables entre les espèces ou, en ce domaine, l'être humain est-il unique en son genre ? (ii) l'attitude exprimée par un être humain est-elle la même tout au long de son histoire de vie ? (iii) l'expression d'une attitude d'approche face au risque revêt elle une utilité quelconque ? (iv) l'attitude exprimée lors d'une décision économique peut-elle être retrouvée dans d'autres domaines ?

En effet, des inconnues subsistent concernant les origines évolutives et développementales des attitudes face au risque exprimées par les êtres humains. Ce travail de thèse adopte une approche *développementale et comparative* de la prise de décision sous risque, en suivant l'impulsion déjà amorcée dans ce domaine (Brosnan & Wilson, 2023; Nelson *et al.*, 2022; Rakoczy & Haun, 2020; Sutter *et al.*, 2019). Ce travail s'appuie sur les connaissances inhérentes à la psychologie du développement et à la psychologie comparée chez les primates humains et non-humains. L'approche comparative offre un cadre d'étude qui permet d'examiner un comportement animal sous deux perspectives (*i.e.*, ultime et proximale), à travers quatre questions complémentaires concernant la phylogenèse, la fonction, l'ontogenèse et les mécanismes des comportements étudiés. Initialement proposée par Nikolaas Tinbergen, cette

approche permet d'accéder à une compréhension approfondie des comportements animaux, de leur évolution et des processus sous-jacents impliqués dans leur réalisation (Bateson & Laland, 2013b; Tinbergen, 1963). Les perspectives de cette approche se détaillent comme suit :

Les problèmes ultimes

La question de la phylogenèse consiste à examiner et comparer les comportements et les aptitudes cognitives d'une espèce spécifique, comme les humains, avec d'autres espèces plus ou moins étroitement proches sur l'arbre phylogénétique. L'objectif est de comprendre comment ces comportements et capacités ont émergé et changé au cours de l'histoire évolutive des différentes espèces. Cette question nous donne la possibilité de comprendre les traits spécifiques de chaque espèce, tout comme ceux communs à plusieurs espèces, et à quel degré ces caractéristiques sont partagées. Dans le cas de l'attitude face au risque, les questions qui peuvent être posées sont : (i) comment la prise de décision a évolué chez l'être humain ? et (ii) l'attitude observée chez l'être humain adulte est-elle commune à tous les primates ? En réponses, diverses hypothèses peuvent être émises, telles que l'existence d'une aversion universelle au risque dans des situations de gain, l'existence d'une expression comportementale liée à certains taxons ou, de manière plus spécifique, la possibilité que la manifestation comportementale en réponse au risque soit fonction des singularités de chaque espèce.

La question de la fonction est celle de « l'utilité actuelle » ou de la « signification adaptative » du comportement observé. De nos jours, le terme « d'utilité actuelle » est préféré

(Bateson & Laland, 2013b, 2013a; Nesse, 2013), car il souligne que la fonction actuelle d'un comportement peut différer de sa fonction originelle, de son exaptation¹² (Gould & Vrba, 1982), sans faire de suppositions sur les processus qui ont conduit à ces changements. En utilisant ce terme, il est reconnu que l'évolution dudit comportement peut être le fruit de la sélection naturelle, mais aussi basé sur la « réquisition » d'un comportement préexistant afin de remplir une nouvelle fonction (Bateson & Laland, 2013b). Ainsi, les larmes qui permettent la lubrification, la nutrition et la protection de l'œil, remplissent également une fonction prosociale et émotionnelle chez l'être humain (Gračanin *et al.*, 2018). Dans cette perspective, nous pouvons interroger l'utilité pour la survie de l'aversion au risque qui permet d'éviter de fournir des efforts dans la réalisation d'actions qui peuvent ne pas aboutir. À l'inverse, nous pouvons interroger l'utilité de l'appétence au risque qui permet parfois d'obtenir une récompense plus grande ou des informations plus précises caractérisant l'incertitude.

Les problèmes proximaux

La question des causes ou des mécanismes porte sur les mécanismes sous-jacents qui permettent au comportement observé de se réaliser. Elle concerne les causes immédiatement observables ou mesurables d'un comportement, telles que les processus physiologiques,

¹² L'exaptation est le concept selon lequel une caractéristique ou un comportement peut changer de fonction au cours du temps, en utilisant une structure préexistante pour remplir une nouvelle fonction, sans qu'il y ait de changement significatif dans la structure elle-même.

neuronaux, mais aussi culturels, environnementaux ou contextuels. En étudiant les mécanismes sous-jacents de l'attitude face au risque, on peut rendre compte de l'influence de différents facteurs, qu'ils soient contextuels ou individuels. Par exemple, l'attitude face au risque peut être modulée par le degré d'incertitude de la situation, la survenue d'événements inattendus, le type de risque ou encore le genre de l'agent décideur.

La question du développement ou de l'ontogenèse, à l'instar de la psychologie du développement, se concentre sur processus de développement du comportement observé chez l'individu, depuis la naissance jusqu'à l'âge adulte et le vieillissement. Elle permet de comprendre comment les comportements évoluent et se modifient au fil du temps, en fonction des expériences et de l'environnement des individus. Dans le cas de l'attitude face au risque chez l'espèce humaine, cette approche permet de (i) mieux comprendre le développement de cette attitude chez les enfants, (ii) savoir si elle diffère de celle exprimée à l'âge adulte, et (iii) si oui, de connaître quand ce changement s'opère. En outre, cette approche permet également de mettre en évidence l'influence au cours du développement d'autres compétences, par exemple, la planification de l'avenir.

Dans le cadre de la présente thèse, nous sollicitons une approche comparative et développementale afin d'apporter des éléments de réponse à certaines des questions précédentes. En outre, nous sollicitons également des paradigmes expérimentaux issus de l'économie comportementale et de l'étude des comportements décisionnels chez les primates non-humain (Haun *et al.*, 2011). Les situations utilisées dans ces domaines sont majoritairement

appel au jeu (*e.g.*, jeu économique) comme paradigme expérimental. Cela permet de s'affranchir de limitations telles que l'énonciation d'instructions complexes, susceptibles de biaiser les passations. Cela aboutit à la création de tâches simples, adaptables, structurées et standardisées, qui sont idéales à la fois pour l'approche comparative (Brosnan, 2021; Brosnan *et al.*, 2013; Brosnan & Wilson, 2023) et pour l'approche développementale (Rosati *et al.*, 2023; Sutter *et al.*, 2019)

La seconde partie de ce cadre théorique présente une vision écologique, évolutive et développementale de la prise de décision sous risque. Pour cela, nous sollicitons l'éclairage de la cognition comparée et de la psychologie du développement. Cette approche cherche à comprendre comment les individus prennent des décisions en situation de risque en tenant compte de leur environnement et des processus évolutifs et développementaux qui les influencent. Il convient de noter, toutefois, que ces recherches sont encore très limitées à ce jour, avec peu de tests empiriques et de comparaisons standardisées. Cela restreint notre capacité à formuler des hypothèses solides sur les attitudes et les comportements de prise de décision face au risque, en tenant compte de l'influence de la phylogénèse, des mécanismes proximaux et du développement (cf. Paulsen, Platt, *et al.*, 2012; Redshaw & Ganea, 2022; Robson, 1996; Rosenbaum *et al.*, 2021). En intégrant ces deux approches, notre objectif est de contribuer aux travaux méthodologiques et théoriques visant à mettre en lumière les effets de la phylogénèse, des mécanismes proximaux et du développement sur la prise de décision en situation risquée.

2.1. Les problèmes ultimes du risque

Les problèmes ultimes relèvent principalement des domaines de la biologie et de l'éthologie. À ce niveau d'analyse, sont examinées les forces motrices et les processus évolutifs ayant conduit à l'émergence et l'expression du comportement observé. Cette approche permet d'évaluer le degré de partage ou d'unicité des attitudes face au risque. La question de la phylogenèse et celle de la fonction conduisent à explorer les avantages évolutifs de certaines expressions comportementales et stratégies de prise de décision en situation de risque, ainsi que les contraintes qui ont favorisé leur émergence.

2.1.1. Phylogenèse et fonction de l'attitude face au risque

Real & Caraco (1986) émettent l'hypothèse selon laquelle les défis auxquels sont confrontés les êtres humains adultes sur le plan économique sont en partie partagés avec les animaux non-humains dans d'autres contextes. Leur hypothèse sous-entend que nous pouvons tirer des enseignements de l'étude de la phylogenèse de ces comportements et de leurs fonctions, mais également tenter de trouver des explications adaptatives pour mieux comprendre comment les attitudes face au risque se manifestent. En effet, décider dans l'incertain est commun à toutes les espèces vivantes, qu'il faille choisir des actifs financiers, décider de traverser une route ou de fournir de l'énergie pour récolter de la nourriture. Ainsi, les modèles théoriques de prise de décision sous risque et les études portant sur les attitudes face au risque établis chez les primates non-humains, mettent en évidence des similitudes entre les

espèces (De Petrillo & Rosati, 2021; Haux *et al.*, 2023; Houston *et al.*, 2014). Ces études présentent cependant des limites méthodologiques dans la mesure où les échantillons sont relativement petits et le nombre d'espèces étudiées assez restreint (De Petrillo & Rosati, 2021; ManyPrimates *et al.*, 2019, 2020). Malgré cela, la littérature actuelle suggère l'existence de processus décisionnels similaires chez les primates humains et non-humains (Krupenye *et al.*, 2015; Lakshminarayanan *et al.*, 2011; Nioche *et al.*, 2019, 2021). Ainsi, une asymétrie de traitement gain/perte semble être présente à divers degrés, au sein du même taxon de l'espèce humaine, les *Hominoidea* (Krupenye *et al.*, 2015) ou dans des taxons proches chez les *Cercopithecidae* (Farashahi *et al.*, 2018; Nioche *et al.*, 2019, 2021) mais aussi chez des taxons plus éloignés tels que les *Cebidae* (Chen *et al.*, 2006; Lakshminarayanan *et al.*, 2011). À noter que certains auteurs émettent des réserves sur ce dernier point (Silberberg *et al.*, 2008). Quoi qu'il en soit, les primates non humains semblent également avoir tendance à prendre des risques pour éviter des pertes certaines et à éviter les situations les plus risquées lorsqu'il y a un gain en jeu. L'aversion aux pertes, ainsi que l'appétence au risque qu'elle provoque pour éviter une perte sûre, apparaissent en effet, largement partagées chez les primates (Chen *et al.*, 2006; Garcia *et al.*, 2021; Lakshminarayanan *et al.*, 2011; Nioche *et al.*, 2019, 2021; Smith *et al.*, 2017). Elles sont également présentes chez d'autres espèces telles que les rats (e.g., Constantinople *et al.*, 2019) ou certains invertébrés (e.g., De Agrò *et al.*, 2021). Dans le domaine des gains en revanche, les comportements paraissent plus variables entre les espèces, même si une appétence au risque en situation de gain est globalement rapportée (Lacombe *et al.*, 2022, pour une revue détaillée). Chez les primates non-humains testés en situation de gain, des études montrent une préférence

pour les options les plus risquées (e.g., Haun *et al.*, 2011; Heilbronner *et al.*, 2008; Nioche *et al.*, 2019, 2021; Rivière *et al.*, 2018) et quelques autres rapportent une préférence pour des options plus sûres (e.g., MacLean *et al.*, 2012; Rivière *et al.*, 2019). En 2011, via le paradigme intitulé « equivalent mean payoff gamble task », Haun et collaborateurs proposent aux sujets de choisir entre une option risquée et une option moins risquée ou certaine. Dans leur étude, les options proposées ont la même valeur attendue, c'est-à-dire que la somme des récompenses pondérées par leur probabilité est identique pour les deux options (e.g., quatre avec 25% de chance d'obtention VS une avec 100%). Les résultats montrent que les quatre espèces étudiées sont globalement preneuses de risque en situation de gain. Il existe, cependant, des différences interspécifiques au niveau de cette propension au risque. Plus précisément, les orangs-outans et les chimpanzés choisissent l'option risquée plus souvent que les gorilles et les bonobos. Une appétence au risque est également observée chez les macaques (Hayden *et al.*, 2008; Nioche *et al.*, 2019, 2021; Mais voir : Pelé *et al.*, 2014) et les mangabeys (Rivière *et al.*, 2018). Il est important de noter que plus loin dans l'arbre phylogénétique, des résultats discordants sont observés chez les singes capucins (cf. Chen *et al.*, 2006; De Petrillo *et al.*, 2015; Rivière *et al.*, 2019). Encore plus loin, une aversion au risque est rapportée chez les lémuriers (MacLean *et al.*, 2012).

Quoi qu'il en soit, chez les primates non-humains, l'analyse de la littérature suggère une appétence au risque dans les domaines des pertes et une attitude face au risque variable dans le domaine des gains. Des pressions de sélection ont pu conduire à des convergences comportementales chez certaines espèces et à des divergences chez d'autres. Ainsi, ces

différences d'expression comportementales peuvent être liées à des facteurs environnementaux tels que l'abondance ou le type de nourriture à disposition, à des stratégies de récolte de nourriture différentes ou bien encore aux structures sociales des espèces. Par ailleurs, le gain et la perte ne représentent pas la même chose. En effet, dans certains contextes écologiques, choisir sous risque de perte est analogue à un danger de mort (de faim ou par prédation) ou à la survenue de blessures, c'est-à-dire des situations dites non compensables. En revanche, le choix sous risque de gain implique souvent une perte dite relative, celle de passer à côté de la récompense du choix proposé et de l'énergie dépensée pour s'engager dans l'action. Cette asymétrie de traitement est étudiée à l'aune de modèles analogues à ceux développés en économie comportementale (cf. 1.1.5). Dans ces études, les individus cherchent à maximiser ou optimiser leur fitness selon le contexte décisionnel et un point de référence, par exemple leur budget énergétique et la dépense que la décision engendre par rapport à ce qu'elle apporte (De Petrillo & Rosati, 2021; Hills *et al.*, 2015; Mehlhorn *et al.*, 2015; Stephens, 1981).

La *risk sensitive theory* propose une explication à la fois écologique et évolutive des différences observées dans les choix en situation de risque chez différentes espèces animales (Caraco, 1980; Kacelnik & Bateson, 1996, 1997; Real, 1980; Real *et al.*, 1982; Real & Caraco, 1986). Selon cette théorie, les animaux déploient des stratégies de recherche de nourriture qui maximisent leur taux de gain énergétique tout en minimisant leur taux de perte, pouvant inclure la mortalité et les blessures dues à la recherche de nourriture. Ainsi, le comportement exprimé de la part d'un animal peut être semblable à celui d'un décideur et dépend également aussi d'un point de référence : le budget énergétique actuel que celui-ci cherche à optimiser (Stephens,

1981). Ainsi, dans le cas d'un équilibre énergétique faible et dans un environnement pauvre en nourriture, l'appétence au risque s'avère avantageuse car elle permet de ne pas mourir de faim (Moran *et al.*, 2021). Au contraire, dans un environnement riche en ressources alimentaires, l'évitement du risque s'avère avantageux pour un animal au budget énergétique positif (De Petrillo & Rosati, 2021; Kacelnik & El Mouden, 2013).

En outre, être sensible aux risques peut permettre la promotion de stratégies de recherche de nourriture différentes en fonction du contexte (de la disponibilité de nourriture). Cette sensibilité implique un compromis entre les stratégies de recherche de nourriture, plus précisément entre les stratégies d'exploration de l'environnement à la recherche de nouvelles ressources alimentaires et les stratégies d'exploitation des ressources déjà disponibles (Mehlhorn *et al.*, 2015). Selon la théorie du *compromis exploration-exploitation*, les animaux doivent trouver un équilibre entre l'exploration de nouveaux environnements susceptible de contenir des sources de nourriture plus rentables, et l'exploitation des sources de nourriture connues. Cette théorie prédit que les animaux sont davantage preneurs de risque lorsqu'ils explorent de nouveaux environnements et plus prudents lorsqu'ils exploitent des sources de nourriture connues et fiables (Stephens & Krebs, 1987, pp. 140–141). Il est important de noter que les comportements d'exploration et d'exploitation correspondent à des stratégies de recherche de ressources alimentaires inscrites sur un *continuum* (Mehlhorn *et al.*, 2015). La théorie du *compromis exploration-exploitation* peut être considérée comme complémentaire à la *Risk sensitive foraging theory*, dans la mesure où elle précise l'effet du contexte sur la prise de décision. En effet, il est impératif pour un animal au budget énergétique bas évoluant au sein

d'un environnement pauvre de prendre des risques. Ce même animal peut, par contre, se permettre d'être neutre ou averse au risque dans un environnement où la nourriture est abondante. À l'inverse, un animal au budget énergétique positif, n'a aucun avantage à prendre des risques dans un environnement riche. Celui-ci peut également se permettre d'être moins preneur de risque dans un environnement pauvre en nourriture. En somme, la théorie de l'exploration-exploitation souligne l'influence du contexte de la décision au travers de l'équilibre entre l'exploration de nouvelles opportunités et l'exploitation de sources connues de nourriture. La *Risk sensitive foraging theory* met, elle, l'accent sur la façon dont la décision sous risque peut maximiser ou optimiser la survie et la reproduction d'un individu en fonction d'un point de référence, par exemple son équilibre énergétique.

Outre la fonction primaire de survie, les comportements d'approche et d'évitement de situations risquées peuvent également s'appliquer à des ressources et à des environnements plus abstraits et ainsi revêtir d'autres fonctions grâce à l'exaptation des stratégies de recherche développées dans d'autres environnements (*e.g.*, environnement nutritif). Ainsi, ces comportements peuvent remplir une fonction de réduction de l'incertitude (Golman & Loewenstein, 2018; Kobayashi & Hsu, 2019; Loewenstein, 1994; Mehlhorn *et al.*, 2015) ou de satisfaction de notre curiosité (Berlyne, 1966; Kidd & Hayden, 2015). Dans ce cadre, décider de l'exploration d'une situation incertaine ou de son évitement peut concerner le gain d'informations et l'élargissement des connaissances sur le monde pour un individu (Hills *et al.*, 2012, 2015). Un individu peut, donc, décider sciemment de passer à coter d'une récompense réelle dans le but d'obtenir des informations caractérisant l'incertitude autour d'une situation ou

bien, au contraire, ne pas prendre ce risque et se contenter des informations déjà en sa possession (Mehlhorn *et al.*, 2015). En complément des explications impliquant l'environnement de vie des espèces, ce dernier point pourrait expliquer la variabilité inhérente à l'attitude face au risque dans le domaine du gain.

Selon la *information-gap theory* (Berlyne, 1966; Golman & Loewenstein, 2018; Loewenstein, 1994), en situation d'incertitude, les décisions peuvent être influencées par le manque d'informations ou le désir de réduire l'écart perçu entre un état de connaissance actuel et un état des connaissances à acquérir. Un organisme peut, en effet, être confronté à une situation nouvelle, car caractérisée par un manque d'informations concernant la qualité ou la localisation des ressources alimentaires. Cela crée un écart d'informations entre ce que l'individu sait et la situation à laquelle il fait face. Dans un premier temps, il résiderait un avantage à récolter des informations caractérisant l'incertitude de la situation. En effet, leur obtention permettrait de réduire cette incertitude. Un tel avantage se dissiperait face à une situation risquée déjà rencontrée ou bien face à une situation sûre (Cohen *et al.*, 2007; Hills *et al.*, 2015; Mehlhorn *et al.*, 2015; Nussenbaum *et al.*, 2022). Chez l'être humain, la curiosité et la néophilie pourraient s'avérer des vecteurs efficaces dans l'acquisition du savoir ainsi que des facteurs explicatifs pour l'attrait envers les situations incertaines et risquées (cf. sous-chapitre 2.2.1.2).

Par conséquent, le « *goût du risque* » peut être considéré comme une stratégie pour obtenir des informations sur une situation et ainsi réduire l'incertitude qui y est associée, lorsque, par exemple, aucune information interne n'est disponible (*i.e.*, savoirs sémantiques). Il peut également être postulé l'existence d'un lien entre le degré d'attrait pour la nouveauté chez une

espèce donnée et la propension à prendre des risques. Il s'agit d'ailleurs d'une hypothèse que nous avons souhaité tester dans le cadre du travail expérimental rapporté dans la présente thèse.

Malgré la pertinence de l'approche phylogénétique et fonctionnelle de la prise de décision sous risque, elle ne permet pas à elle seule de comprendre l'attitude face au risque chez l'être humain, ni de rendre compte de la variabilité intra espèce et inter-individuelle observée chez l'être humain, mais également chez d'autres espèces (De Petrillo & Rosati, 2021). Il s'avère nécessaire d'en étudier le développement ainsi que les mécanismes sous-jacents pour avoir une compréhension complète de la prise de décision face au risque. Une approche mixte, qui combine ces différentes perspectives, apparaît donc essentielle.

2.2. Les problèmes proximaux

Les questions proximales sont importantes à traiter si l'on souhaite comprendre comment le comportement observé s'exprime et se développe chez un individu. Elles se situent au niveau des processus biologiques, cognitifs et culturels qui influencent le comportement tout au long de la vie. La question de la causation porte sur le fonctionnement des mécanismes qui sont responsables de l'expression d'un comportement spécifique chez l'individu d'une espèce donnée. Quelles sont les bases biologiques ou cognitives qui sous-tendent une attitude face au risque chez l'être humain ? Quelles sont les influences contextuelles ou culturelles qui contribuent à cette attitude ? Ces questions portent sur le rôle des facteurs intrinsèques et extrinsèques concernant l'expression du comportement d'un individu. La question de l'ontogenèse se concentre sur le développement du comportement. En examinant les

trajectoires développementales, nous pouvons mieux appréhender les influences qui façonnent les expressions comportementales face au risque ainsi que leurs changements aux différents stades de la vie. Ces questions, principalement abordées dans le domaine de la psychologie du développement, prennent en considération les influences biologiques, cognitives et culturelles qui façonnent le comportement observé ainsi que les facteurs développementaux qui jouent un rôle dans son expression.

2.2.1. Ontogenèse et mécanismes de la décision sous risque chez l'enfant : comment se développe l'attitude face au risque chez l'être humain et quelles sont les causes proximales influençant son expression ?

Divers facteurs influencent le choix de l'individu à accepter ou à refuser de prendre un risque. Par exemple, nous avons présenté précédemment que la distinction entre la situation de gain et la situation de perte est associée au renversement complet de l'attitude exprimée. En outre, des facteurs propres à l'individu, tels que le genre et l'impulsivité, peuvent également influencer la décision sous risque. Le manque d'information, ainsi que la modalité de présentation de la situation ou des probabilités, peuvent aussi jouer un rôle important. Par souci de clarté, nous développons dans un premier temps le questionnement sur la trajectoire développementale puis présentons quelques facteurs relevant à la fois de facteurs propres à l'individu et propres à son environnement ou à celui de la décision.

2.2.1.1. La trajectoire développementale de la décision sous risque économique et physique

La forme précise de la trajectoire développementale de la décision sous risque demeure sujette à débat au sein de la communauté scientifique. L'adolescence est généralement considérée comme une période où les individus sont particulièrement enclins à prendre des risques. Cependant, il convient de souligner l'absence de consensus sur cette question (Defoe, 2021; Defoe *et al.*, 2019; Paulsen, Platt, *et al.*, 2012). En effet, certains travaux suggèrent une décroissance linéaire de la prise de risque (e.g., Crone *et al.*, 2008; Harbaugh *et al.*, 2002; Levin, Hart, *et al.*, 2007; Levin & Hart, 2003; Paulsen *et al.*, 2011; Paulsen, Platt, *et al.*, 2012; Schlottmann, 2000; Weller *et al.*, 2011). Certains ne rapportent aucun changement dans la prise de risque entre les enfants et les jeunes adolescents (Defoe, 2021; Defoe *et al.*, 2015; Van Leijenhorst *et al.*, 2008). D'autres, enfin, proposent que la trajectoire développementale de la prise de risque corresponde à une courbe en U inversé avec un pic des décisions risquées entre 11 et 18 ans (e.g., Boyer, 2006; Burnett *et al.*, 2010; Steinberg, 2004; Sweeten *et al.*, 2013).

Une explication préliminaire à cette disparité de résultats pourrait résider dans l'existence d'attitudes distinctes et spécifiques face au risque à chaque domaine (*i.e.*, situation de gain versus situation de perte). En effet, il existe une différence dans le degré d'expression de cette asymétrie entre les adultes et les enfants. Les attitudes face au gain et à la perte constituent deux comportements distincts qui semblent ne pas suivre la même trajectoire de développement (Levin, Hart, *et al.*, 2007; Levin & Hart, 2003; Weller *et al.*, 2011). Ainsi, dans une étude menée

par Weller et ses collègues, et publiée en 2011, 734 participants âgés de 5 à 85 ans sont soumis à une tâche de prise de décision en situation de gain et en situation de perte. À chaque essai (trois au total) les participants doivent choisir entre une option garantie offrant une pièce de monnaie (un quart de dollar américain) et une option risquée offrant respectivement deux, trois ou cinq pièces avec des probabilités d'obtention de 50%, 33% et 20%. Les deux options avaient donc une valeur attendue égale (*i.e.*, espérance des gains). Les résultats de cette étude suggèrent que le changement d'attitude observé chez les enfants dans le domaine des gains est attribuable à une augmentation de l'aversion au risque, tandis que dans le domaine des pertes, l'attitude des enfants envers le risque demeure constante.

Une autre explication à l'absence de consensus concernant la forme de la trajectoire développementale de la décision sous risque renvoie au type de risque face auquel la décision est prise. Dans la littérature, sont souvent opposés le risque d'ordre économique à celui d'ordre physique. Les jeux économiques, tels que *l'équivalent mean payoff gamble task*, sont des paradigmes largement utilisés en raison de leur structure claire, simple et standardisée. Leur grande robustesse, résultant à la fois de leur simplicité et de l'absence générale d'instructions verbales, les rend particulièrement adaptés aux comparaisons interspécifiques et inter-âges (Brosnan & Wilson, 2023). Suite aux travaux précurseurs de William Harbaugh (2002), une revue de la littérature récente (Sutter *et al.*, 2019) suggère la diminution de la propension à sélectionner des options risquées par rapport à des gains sûrs avec l'âge. Plus précisément, cette revue indique la survenue d'un changement, caractérisé par une diminution de la prise de risque dans le domaine du gain, entre 7 et 10 ans (Deckers *et al.*, 2015; Paulsen, Platt, *et al.*, 2012). Des travaux

menés sur des groupes d'âges plus avancés confortent ces résultats en montrant une absence d'effet significatif de l'âge sur la prise de risque entre 10 à 18 ans (e.g., Eckel *et al.*, 2012; Mata *et al.*, 2011; Munro & Tanaka, 2014; Sutter *et al.*, 2013). L'ensemble de ces études suggère que les attitudes face au risque économique subissent des changements avant l'adolescence. Ces changements se caractérisent par une diminution linéaire et progressive de la propension à prendre des risques dans le domaine des gains au fur et à mesure que les enfants atteignent l'âge de l'adolescence puis deviennent adultes. Certains auteurs postulent la transition du comportement d'appétence pour le risque à un comportement d'aversion entre l'âge de 7 ans et demi et celui de 10 ans (Paulsen, Carter, *et al.*, 2012; Sutter *et al.*, 2019). L'étude spécifique des enfants correspondant à cette tranche d'âge est susceptible de fournir des données essentielles à la compréhension du développement de la prise de décision en situation de risque (Paulsen, Platt, *et al.*, 2012). Elle permettrait, en effet, d'identifier de manière plus précise les étapes du développement et les facteurs qui influencent les comportements face au risque à un stade précoce de la vie.

Cependant, bien que le risque économique fasse partie du monde réel, il n'est qu'une composante parmi d'autres du risque (Boyer, 2006; Paulsen, Platt, *et al.*, 2012). Sa trajectoire développementale pourrait donc être totalement différente de celle du risque physique. Nous avons vu précédemment que la trajectoire développementale de la prise de décision sous risque peut correspondre à une courbe en U inversé, dont le point culminant se trouve entre 11 et 18 ans. Afin de rendre compte d'une telle courbure, Ivy Defoe (2021) développe un modèle intitulé : le *Developmental Neuro-Ecological Risk-taking Model* (ci-après *DNERM*). Ce modèle rend

compte du pic de prise de risque à l'adolescence en considérant cette période comme offrant le plus d'opportunités à prendre des risques. Le modèle de Defoe et collaborateurs suggère que l'augmentation de la prise de risque chez les adolescents est associée au fait que, face à davantage d'opportunités, ces derniers auraient plus d'incitation à adopter une attitude risquée tels que les comportements de consommation d'alcool ou d'abus de substances. Qu'en est-il pour les opportunités partagées de risque physique ? Face à la même opportunité de prendre un risque physique, un jeune enfant s'engagera-t-il dans une conduite moins risquée qu'un enfant plus âgé ? La diminution de la prise de risque observée aux alentours de 8 ans dans les jeux économiques surviendrait-elle également dans le domaine physique ? En ce domaine, les travaux de Defoe et de ses collaborateurs suggèrent que les enfants et les adolescents suivent une trajectoire développementale similaire à celle observée lorsqu'ils sont confrontés à des décisions impliquant des jeux économiques, à condition que les opportunités de prise de risque soient similaires dans ce domaine. Les travaux de Defoe et de ses collaborateurs suggèrent que les enfants et les adolescents suivent une trajectoire de développement similaire à celle observée en laboratoire lorsqu'ils sont confrontés à des décisions impliquant des jeux économiques, à condition que les opportunités de prise de risque soient les mêmes pour les deux groupes. (Defoe *et al.*, 2015, 2019). Afin de tester une telle hypothèse, il conviendrait de proposer les deux types de situation aux mêmes participants.

2.2.1.2. Facteurs d'influence au niveau individuel

Le genre :

Parmi les facteurs influençant la prise de décision sous risque, le genre est souvent mis en exergue. Les garçons prennent-ils plus de risque que les filles ? Une récente revue de la littérature rapporte un nombre substantiel d'études suggérant que les filles et les femmes sont davantage averses au risque en situation de gain que les garçons et les hommes (cf. Sutter *et al.*, 2019). Cependant, un nombre non négligeable d'études ne rapporte pas cette différence de comportement due au genre (e.g., Castillo *et al.*, 2018; Munro & Tanaka, 2014; Tymula *et al.*, 2012). D'un point de vue évolutif, la différence due au genre est fréquemment expliquée par le biais de la sélection sexuelle. Il est ainsi suggéré le fait que les mâles ont tendance à prendre des risques pour se mettre en valeur et ainsi augmenter leur succès reproductif (e.g., Pawlowski *et al.*, 2008). Cependant, il semble que chez l'être humain, mais aussi pour des taxons très éloignés (e.g., Brand *et al.*, 2023), cette différence, si elle existe, n'est pas systématisée. En outre, elle serait fortement modulée par des facteurs environnementaux tels que la période de l'année, des facteurs culturels (e.g., Andersen *et al.*, 2013; Cárdenas *et al.*, 2012; Eagly & Wood, 1999) ou encore par le développement de l'individu (Byrnes *et al.*, 1999; Defoe *et al.*, 2015; Slovic, 1966). Il est important de noter que la différence en question semble s'installer avec l'âge. Ainsi, la première étude à observer, en ce domaine, les effets du genre (Slovic, 1966) suggère que la différence entre les filles et les garçons émerge aux alentours de 11 ans. Des études expérimentales récentes confirment cette observation (Andreoni *et al.*, 2020; Khachatryan *et al.*,

2015). Il semble ainsi que le genre puisse influencer de manière différentielle la décision sous risque, mais que cette influence soit modérée par l'âge des individus testés, avec une différence absente chez les jeunes enfants (Andreoni *et al.*, 2020), émergente chez les adolescents et s'accroissant jusqu'à l'âge adulte (Charness & Gneezy, 2012).

Perception et intégration des probabilités :

La perception et l'intégration des probabilités, qu'elles soient subjectives ou objectives, jouent un rôle crucial dans l'évaluation des situations risquées et des attitudes qui en découlent. Selon la *prospect theory*, les individus ont tendance à évaluer subjectivement les probabilités (cf. sous-chapitre 1.1.5), en surestimant celles des événements rares ou peu probables et sous-estimant celles des événements fréquents ou plus probables (Tversky & Kahneman, 1992; Tversky & Wakker, 1995). Nous avons vu précédemment que les enfants sont plus enclins à prendre des risques que les adultes, que ce soit en situation de gain ou de perte (Harbaugh *et al.*, 2002; Levin, Hart, *et al.*, 2007; Levin & Hart, 2003). Une absence de prise en compte des probabilités associées aux conséquences des options est un facteur souvent mis en exergue pour expliquer les performances observées chez les enfants. La question posée est la suivante : les enfants sont-ils en capacité de percevoir l'amplitude du risque et agissent-ils en conséquence ? Dans leur ouvrage intitulé « La genèse de l'idée de hasard chez l'enfant », Piaget et Inhelder (1951) avancent l'idée selon laquelle les enfants âgés de moins de 13 ans ne sont pas aptes à intégrer plusieurs dimensions dans un jugement abstrait. Ils ne se concentreraient que sur la récompense, sans prendre en compte sa probabilité d'obtention. Confrontés à un choix entre

une option risquée et une option moins risquée ou sûre de même valeur attendue, les jeunes enfants seraient susceptibles de choisir l'option offrant la récompense la plus élevée, indépendamment de ses chances de l'obtenir. Cette tendance pourrait alors entraîner chez les enfants une apparente prise de risque inconsidérée dans la mesure où ils ne prennent pas en compte les chances de réalisation des conséquences associées à chaque option.

Cependant, un faisceau de preuves indique que les enfants possèdent, bien avant l'âge de 13 ans, une aptitude à distinguer ce qui est probable de ce qui ne l'est pas (Huber & Huber, 1987; Redshaw & Ganea, 2022), à prendre en compte *a minima* intuitivement les probabilités (Denison & Xu, 2010; Xu & Garcia, 2008) et à prendre des décisions en fonction de celles-ci (Defoe *et al.*, 2015; Schlottmann, 2001; Schlottmann & Anderson, 1994). Sur le plan comportemental, une négligence des probabilités devrait entraîner un choix en faveur de l'option associée à la fois au risque et à la plus grande récompense. Afin d'évaluer cette hypothèse, Levin & Hart (Levin, Hart, *et al.*, 2007; Levin, Weller, *et al.*, 2007; Levin & Hart, 2003) proposent à des enfants âgés entre 5 et 11 ans une tâche opposant garantie et risque dans le domaine du gain et de la perte. Variante de *l'équivalent mean payoff gamble task*, cette tâche consiste à présenter aux participants un set de bols. La moitié de ce set représente l'option risquée (une récompense n'est présente que sous un seul bol) et l'autre moitié représente l'option garantie (une récompense est présente sous tous les bols). Les résultats montrent, qu'à partir de 6 ans, les enfants sont aptes à comprendre les probabilités de réalisation des options présentées. Cependant, il est à noter que les enfants semblent répondre moins fortement aux changements de niveau de risque (i.e., de probabilité) que les adultes (Levin, Hart, *et al.*, 2007; Levin & Hart, 2003) et parfois

décident de ne pas les prendre en compte (Lang & Betsch, 2018). Une telle attitude se traduit par une appétence au risque chez les enfants, là où les adultes sont averses dans le domaine du gain.

Or, les enfants sont en capacité d'utiliser des règles multiplicatives entre la probabilité d'obtention et la taille du prix pour orienter leur décision face au risque (Levin, Hart, *et al.*, 2007; Schlottmann, 2001). Il se pourrait que les enfants n'attribuent simplement pas la même valeur aux probabilités que les adultes, se focalisant davantage sur la part de gains que sur la probabilité de perdre. Levin et Hart (2007) suggèrent que ce comportement pourrait résulter d'un manque d'expérience du risque. Certains auteurs suggèrent ainsi que les enfants peuvent prendre des décisions prenant en compte la valeur attendue (Schlottmann, 2000), mais qu'ils présentent des difficultés à systématiser l'utilisation des informations collectées afin de distinguer les situations risquées, avantageuses de celles qui ne le sont pas. En outre, la probabilité pourrait ne pas être prise en compte en tant que telle (Lang & Betsch, 2018) mais servir de « détecteur » de ce qui est incertain. L'enfant orienterait ainsi son comportement vers ce qui est incertain d'une manière générale (L. Schulz & Bonawitz, 2007) car l'utilisation de la probabilité *per se* serait encore trop coûteuse avant l'âge de 9 ans (Kidd *et al.*, 2012). Ainsi, l'appétence pour le risque pourrait alors être un épiphénomène ou le reflet d'un apprentissage par exploration chez les jeunes enfants. À travers leurs comportements exploratoires dirigés vers l'incertain, ils apprendraient au fur et à mesure à effectuer des choix de plus en plus optimaux. Leur apparente prise de risque, serait donc conséquente à un apprentissage de l'incertitude par l'incertitude. Par ce biais, ils apprendraient à systématiser l'utilisation des informations utiles pour définir si une décision est avantageuse ou non. Cela conduit à observer des jeunes enfants exprimant une préférence pour

les options les plus risquées. Cette préférence serait alors liée à la présence d'options associées à des probabilités, mais celles-ci serviraient de signaux généraux indiquant si une option est incertaine ou certaine. Les options risquées seraient alors sélectionnées même si cela conduit à négliger une décision qui pourrait entraîner une conséquence positive.

Selon Levin et Hart, les enfants deviendraient progressivement plus sensibles aux variations de probabilités d'une situation (*i.e.*, le degré d'incertitude) entre 5 et 11 ans (Levin, Hart, *et al.*, 2007; Levin & Hart, 2003). Avec le temps, les enfants cesseraient d'utiliser la probabilité comme un indicateur général de l'incertitude. Ils affinaient progressivement leurs décisions, en privilégiant les options les plus bénéfiques et en évitant les moins avantageuses. Ils apprendraient, dans un premier temps, à tirer parti du risque tout en évitant les conséquences négatives, ce qui les mènerait progressivement à adopter le comportement d'évitement du risque généralement observé chez les adultes. Bien que l'utilisation des probabilités ne soit pas aussi avancée que celle des adultes, les enfants manifestent une certaine capacité à les utiliser dans la prise de décision en situation de risque. Il semble donc que l'utilisation des probabilités ne suffise pas à expliquer le changement d'attitude vers une aversion pour le risque observé chez les adultes (Defoe *et al.*, 2015).

La curiosité et l'attrait pour la nouveauté :

La curiosité correspond à un état mental qui incite les individus à rechercher activement de nouveaux stimuli, de nouvelles informations ou expériences. Il s'agit de combler un besoin intrinsèque de connaître et de comprendre l'environnement qui nous entoure. En clair, c'est une

motivation intrinsèque à l'exploration. Le psychologue Daniel Ellis Berlyne (Berlyne, 1954, 1966) distingue deux dimensions de la curiosité : (i) la curiosité épistémique liée à la quête de connaissances, de compréhension et de résolution de problèmes, et (ii) la curiosité perceptuelle qui concerne l'attrait pour les stimuli nouveaux ou inattendus, et qui serait un moteur primaire de l'exploration. Berlyne distingue également : (i) la curiosité spécifique, où l'agent ne serait curieux que d'un certain type d'information, et (ii) la curiosité *diversifiée*¹³, motivée par un désir général de nouvelles informations ou de nouveaux stimuli, perceptifs ou cognitifs. La conception actuelle de la curiosité renvoie à une forme spéciale de recherche d'informations intrinsèque à l'individu, dont le but est, soit d'apprendre de nouvelles choses, soit de réduire l'incertitude perçue d'une situation (Kidd & Hayden, 2015; Litman, 2007; Loewenstein, 1994). La curiosité peut alors également être distinguée en termes de finalité. Litman (2007) distingue ainsi la curiosité de type-I et de type-D. La première renvoie à un attrait pour des informations nouvelles motivées par le désir d'apprendre (*cf.* curiosité diversifiée de Berlyne). La seconde renvoie également à la recherche de nouvelles informations mais dans le but de réduire l'incertitude perçue d'une situation donnée. Chez ces différents auteurs, la curiosité est considérée comme une force motrice puissante qui incite à l'exploration, à la recherche de nouvelles informations et à l'apprentissage. Elle est souvent suscitée par la présence d'objets nouveaux ou inconnus. L'acquisition d'informations nouvelles à leur sujet peut représenter en soi une récompense

¹³ Traduction libre

(Kobayashi & Hsu, 2019; Litman, 2008) et augmenter la prise de risque (Matthews *et al.*, 2023). Une situation incertaine donc peut représenter un gain, à la fois factuel et informationnel.

En ce qui concerne le développement des enfants, il convient de noter que le monde qui s'offre à eux constitue une source considérablement plus abondante d'informations et de connaissances à assimiler que celui des adultes. Cette disparité découle des connaissances déjà acquises par les adultes et des ressources cognitives dont ils disposent pour les traiter. Outre leur aptitude précoce à identifier les situations incertaines en utilisant des probabilités (voir section précédente), les enfants sont également capables très tôt de distinguer les sources d'information les plus pertinentes par rapport aux autres (Cook *et al.*, 2011). Ils agissent de manière à optimiser l'acquisition d'informations relatives à l'incertitude tout en minimisant leur charge cognitive (Kidd *et al.*, 2012; Ruggeri *et al.*, 2016).

L'inclination des enfants à s'engager dans des situations incertaines (Sim & Xu, 2017) peut être considérée comme une manifestation de leur curiosité résultant de la perception d'un manque de connaissances et de compréhension (Loewenstein, 1994). Dès leur plus jeune âge, les enfants se dirigent vers l'exploration de situations comportant de l'incertitude, de la nouveauté ou la possibilité d'acquérir de nouvelles informations (Fantz, 1964; Liquin & Lombrozo, 2020) plutôt que de se tourner vers des situations qui fournissent déjà toutes les informations nécessaires (L. Schulz & Bonawitz, 2007) ou même une récompense tangible (Sumner *et al.*, 2019).

La présence d'informations partielles, nouvelles, incertaines ou inattendues promeut donc les comportements exploratoires. L'expérience de l'incertitude semble également jouer un

rôle crucial dans le développement de la métacognition et dans l'apprentissage (Lapidow *et al.*, 2022; Lapidow & Walker, 2020; Liquin & Lombrozo, 2020). La curiosité ou l'attrait pour la nouveauté des enfants, les incite à explorer activement leur environnement, même dans des situations d'incertitude. Ainsi, l'appétence pour le risque, c'est-à-dire l'acceptation d'une situation incertaine en connaissance de son degré d'incertitude (i.e., les probabilités), représente en fait un tremplin à l'apprentissage. Souvent confrontés à un nombre limité d'informations à exploiter, il peut être avantageux pour les enfants de rechercher des options inconnues ou nouvelles (Cohen *et al.*, 2007; Golman & Loewenstein, 2018; Hills *et al.*, 2015; Loewenstein, 1994; Mehlhorn *et al.*, 2015; Rakow & Rahim, 2010). Une hypothèse intéressante suggère que la propension accrue au risque observée chez les enfants, en particulier chez les plus jeunes, peut être attribuée à des comportements motivés par la curiosité (Gopnik, 2020; Rolison *et al.*, 2022). En effet, les enfants sont davantage enclins à explorer de nouveaux environnements qu'à exploiter les récompenses potentielles qui s'y trouvent, dans le but implicite ou explicite d'acquérir des connaissances sur le monde et, par conséquent, de comprendre son fonctionnement (Blanco & Sloutsky, 2020; Liquin & Gopnik, 2022).

En conclusion, l'appétence apparente des enfants pour le risque peut être interprétée comme une tendance intrinsèque à explorer les situations incertaines et nouvelles en vue d'accumuler des informations sur leur environnement. La prise de risque et la recherche de nouveauté peuvent alors être perçues comme deux facettes d'une même pièce car intrinsèquement liées l'une à l'autre, ou à l'inverse, perçues comme deux expressions différentes d'une stratégie plus générale d'exploration. Dans le cadre de cette thèse, un objectif central est

d'explorer le rôle des comportements exploratoires axés sur la nouveauté et l'incertitude dans l'appétence au risque observée chez les enfants en contexte de gain.

Objectifs et hypothèses de la thèse

L'un des objectifs de cette thèse consiste à préciser la trajectoire développementale de la prise de décision sous risque de gain. Nous nous intéressons plus particulièrement à la prise de risque en contexte de gain car l'attitude face au risque en contexte de perte apparaît constante tout au long de la vie. La littérature rapporte une diminution de l'appétence au risque économique entre l'âge de 7 ans et demi et celui de 13 ans (cf. Sutter, 2019, pour une revue). Souhaitant apporter davantage de précisions sur cette trajectoire développementale, nous nous intéressons plus particulièrement aux enfants âgés entre 2 et 3 ans ainsi qu'à ceux âgés entre 7 et 9 ans. Nous souhaitons identifier les facteurs qui modulent l'expression de la prise de risque dans ces tranches d'âge. Nous souhaitons également explorer les éventuelles similitudes ou différences entre différents types de risque, en particulier ceux relevant du domaine économique et ceux du domaine physique. À cette fin, nous examinons la trajectoire développementale de la décision sous risque au travers d'un jeu économique et d'une tâche de simulation de traversée de route. Nous espérons que les résultats expérimentaux obtenus dans le cadre de la présente thèse (i) améliorent notre compréhension de la prise de décision sous risque, et (ii) contribuent à l'élaboration de politiques de prévention visant à permettre aux enfants de bénéficier de leurs décisions risquées sans subir les conséquences néfastes associées. La connaissance des motivations qui incitent les jeunes enfants à prendre des risques pourrait rendre plus efficaces

les campagnes de sensibilisation, destinées aux enfants et à leurs parents. Il s'agit, en effet, de mieux comprendre la prise de risque pour mieux l'encadrer, sans pour autant la supprimer.

Le premier objectif de cette thèse est de préciser la trajectoire développementale en mettant à l'épreuve l'hypothèse d'une décroissance linéaire de la décision sous risque de gain (le domaine des pertes semblant être constant tout au long de la vie). En soumettant une tâche de décision économique à des enfants âgés entre 7 et 9 ans, nous souhaitons mieux comprendre la forme de cette trajectoire développementale afin de mieux cerner le changement de sensibilité face au risque ainsi que l'influence des facteurs qui modulent l'expression de la prise de risque au cours de la vie. En considérant que cette trajectoire développementale puisse présenter des similitudes avec celle des stratégies d'exploration de l'environnement et d'approche de la nouveauté, le second objectif de cette thèse est d'observer le lien entre attrait pour la nouveauté et choix en faveur du risque. Pour ce faire, nous introduisons un élément de nouveauté dans la tâche proposée. Nous souhaitons également observer les points de jonction et/ou de divergence avec d'autres types de risque. À cette fin, nous étudions la trajectoire développementale de la décision sous risque physique à travers une tâche de simulation de traversée de route en situation pédestre. Nous souhaitons améliorer notre compréhension de la décision sous risque d'un point de vue fondamental mais aussi contribuer à l'élaboration de stratégies et de politiques de prévention permettant aux enfants de bénéficier de leurs décisions risquées sans subir les conséquences néfastes associées. En d'autres termes, à mieux comprendre la prise de risque pour mieux l'encadrer sans la supprimer.

Ainsi, nos objectifs peuvent être présentés de la manière suivante :

- 1) Examiner la trajectoire développementale de la prise de décision sous risque de gain. L'une de nos études propose une tâche de décision économique à des enfants âgés de 7 à 9 ans. L'objectif secondaire est d'identifier s'il existe, dans cette tranche d'âge, un point de bascule dans le développement du choix entre appétence et aversion.
- 2) Examiner l'influence des comportements exploratoires centrés sur la nouveauté et l'incertitude sur l'appétence au risque en situation de gain chez les enfants.
- 3) Explorer la relation entre l'attrait pour la nouveauté et l'appétence au risque en situation de gain chez les enfants humains et les primates non-humains.
- 4) Explorer les connexions au niveau de la prise de décision sous risque entre les domaines économique et physique à travers l'exemple d'une situation écologique, le comportement piéton.

Nos objectifs peuvent également être synthétisés de la manière suivante :

Constat de la littérature	Question de la thèse	Objectif	Étude(s)
Les enfants sont davantage preneurs de risque que les adultes seulement dans le domaine du gain et il semble qu'un changement d'attitude s'opère entre six et 10 ans	Est-ce qu'un basculement de l'appétence au risque dans le domaine du gain vers l'aversion est observable à l'âge de huit ans ?	Proposer une tâche de décision sous risque de gain à des enfants âgés entre 7 et 9 ans.	2
L'attrait pour la nouveauté pourrait expliquer la plus grande appétence au risque chez les jeunes enfants. L'approche comparative et les méthodes qui en sont issues permettraient de mieux cerner l'influence de ce facteur sur la décision sous risque.	Est-ce que le degré de néophilie peut expliquer les comportements d'approche ou de rejet du risque ?	Proposer une tâche de décision à des enfants humains et à des primates non-humains afin de rendre compte de l'effet de la nouveauté sur l'attitude face au risque	1 & 2
La prise de risque physique et économique peuvent, à risque équivalent entre les âges, partager une même trajectoire développementale	Est-ce que la prise de décision sous risque économique et physique partagent la même trajectoire développementale ?	Proposer deux tâches écologiquement valides de prise de risque, une économique et une physique, à des enfants âgés entre 7 et 9 ans	3

Partie 3 : Partie expérimentale

3.1. Étude 1

Is economic risk proneness in young children (*Homo sapiens*) driven by exploratory behavior? A comparison with capuchin monkeys (*Sapajus apella*)

<https://doi.org/10.1037/com0000314>

Anthony Roig¹, Hélène Meunier², Eva Poulingue¹, Angélique Marty¹, Régis Thouvarecq¹, James Rivière¹

¹University of Rouen (UNIROUEN), ²Laboratory of Cognitive and Adaptive Neurosciences.

3.1.1. Abstract

Economic risk proneness is displayed by human children and some nonhuman primate species. To explore the role of attraction toward the unknown and the unexpected in economic choices, 2.5-year-old children and capuchin monkeys were presented in Experiment 1 with a gambling task in which participants had to choose between two options, a secure option and a risky option characterized by an unexpected event. In contrast to capuchins, toddlers showed a strong preference for the risky option over the safe option. In Experiment 2, toddlers maintained their risky choices despite the increased salience of the safe option. In contrast to toddlers, capuchins preferentially chose the safe option in this second experiment. We argue that capuchins' risk aversion reflects an exploitation strategy of known and safe options. In human

children, the attractiveness of uncertain rewards appears to be linked to their novelty seeking. We argue that toddlers' risk proneness in the gain domain reflects an exploratory search strategy.

3.1.2. Introduction

When faced with a dilemma between options with the same expected value (EV; the amount of the reward multiplied by the probability of receiving it), choosing the option with higher payoff variance is a risk-prone strategy. Contrary to what is reported in human adults, risk proneness in a gain context is usually observed in monkeys, apes, and human children: rhesus macaques: *Macaca mulatta* (Long *et al.*, 2009; McCoy & Platt, 2005; O'Neill & Schultz, 2010; So & Stuphorn, 2010; Stauffer *et al.*, 2015; Xu & Kralik, 2014, but see Eisenreich *et al.*, 2019), Tonkean macaques: *Macaca tonkeana* (Broihanne *et al.*, 2019), long-tailed macaques: *Macaca fascicularis* (Pelé *et al.*, 2014), orangutans: *Pongo abelii* (Broihanne *et al.*, 2019; Haun *et al.*, 2011), gorillas: *Gorilla gorilla* (Broihanne *et al.*, 2019; Haun *et al.*, 2011), bonobos: *Pan paniscus* (Broihanne *et al.*, 2019; Haun *et al.*, 2011, but see Heilbronner *et al.*, 2008; Rosati & Hare, 2013), chimpanzees: *Pan troglodytes* (Broihanne *et al.*, 2019; Haun *et al.*, 2011; Heilbronner *et al.*, 2008; Rosati & Hare, 2012; Rosati & Hare, 2013), and human children: *Homo sapiens* (Harbaugh *et al.*, 2002; Paulsen *et al.*, 2011; Rivière *et al.*, 2018; Van Leijenhorst *et al.*, 2010; Zhu *et al.*, 2016). This extensive body of work provided evidence that reward-guided behavior is risk tolerant in human children and some nonhuman primate species. It should be noted, however, that one's attitude toward risk is subject to contextual effects. For instance, Yamada and collaborators (2013) found that rhesus monkeys can show weak risk aversion for water rewards. In Yamada *et al.*'s (2013)

study, some monkeys exhibited preference for risky options only when the safe option was less than 120 μ l of fluid. Thus, the mere existence of a gain does not necessarily generate risk-prone behavior. Task features such as the nature of rewards, the quantity of rewards, the number of trials, and the inter-trials intervals influence economic choices in primates (cf. Heilbronner & Hayden, 2013).

The findings with capuchin monkeys (*Sapajus apella*) show some discrepancies between experimental paradigms about their attitude toward risk, with some studies (i.e., Broihanne *et al.*, 2019; De Petrillo *et al.*, 2015) suggesting that they are risk-prone, other studies (i.e., Lakshminarayanan *et al.*, 2011; Pelé *et al.*, 2014) suggesting that they are safe-prone, and a recent study (Rivière *et al.*, 2019) showing that they do not display any behavioral preference in a gambling task for food reward in which participants had to choose between two options with the same expected value, a certain option and a risky option. Altogether, these results suggest that economic preferences are not stable traits but rather highly contextualized choices. Thus, flexible risk attitudes have been reported in several nonhuman primate species: capuchins (De Petrillo *et al.*, 2015; Proctor *et al.*, 2014), mangabeys (Rivière *et al.*, 2018), and rhesus monkeys (Eisenreich *et al.*, 2019; Farashahi *et al.*, 2018). This lability of risk attitudes reflects their strategic adjustments to the contexts they face. Recently, Palminteri and Chevallier (2018) proposed a multi-layer model in which risk sensitivity investigated by behavioural tasks corresponds to the weighted sum of different sources of influence that change with different time constants.

Differences in methodologies render many species comparisons difficult to interpret (cf., Smith *et al.*, 2018). Thus, in their seminal work on framing effects in humans (i.e., risk aversion in a gain context and risk proneness in a loss context), Tversky and Kahneman (1981) offered participants one-shot tasks whereas in most studies measuring risk attitudes in monkeys, animals complete hundreds of trials per day. Such differences in experimental design can greatly influence results insofar as repeated-trials procedures bias participants toward risk-seeking (Heilbronner & Hayden, 2013). The format used to present the gamble is also different between human and animal studies. Typically, in nonhuman primate studies probabilities of winning and losing a gamble are learned from experience, that is through repeated trials, whereas in human studies participants have information about the odds shown to them prior to each trial. Information format influences risk preference insofar as participants are more risk-seeking for experienced than for described gambles. This phenomenon, known as the description-experience gap in risky choices, has been observed in humans (Hertwig & Erev, 2009; Ludvig *et al.*, 2014) and monkeys (Heilbronner & Hayden, 2016). Thus, whereas human adults are risk-averse in one-shot described choices, they are more risk-prone in experience-based choices. Another divergence between typical human and animal studies is the reward currency – money for humans and food for animals. Recent studies (De Petrillo *et al.*, 2020; Rosati & Hare, 2016) showed that humans are relatively more risk-seeking for food compared to money. This lessens the scope of the conclusions that can be drawn from a direct comparison of adult human's decisions about money with adult nonhuman animal's decisions about food. Taken together,

these findings emphasize the need to use identical experimental procedures to allow for direct comparison across species.

Despite these difficulties, inter-species comparative research is well-positioned to identify both the nature of evolutionary processes that favour economic risk proneness and the psychological basis of decision-making under risk. By investigating mechanisms underlying choice, careful comparisons across primate species shed light on the evolutionary roots of human economic decision-making (Kalenscher & van Wingerden, 2011). More precisely, examining similarities and differences in economic behavior among nonhuman and human primates can help disentangle how human-specific patterns of decision-making constrain human risk preferences (De Petrillo & Rosati, 2021). Moreover, comparative research on decision-making biases in primates can provide insight into the biological rationality of economically irrational preferences (Santos & Rosati, 2015).

Little is known about the mechanisms underlying economic preferences in primates. The risk propensity in gain contexts may reflect difficulties to inhibit a prepotent response toward the larger quantity. However, a recent study (Rivière *et al.*, 2018) suggests that economic risk proneness in human children is a robust behavioural regularity that cannot be simply reduced to inhibitory difficulties. Indeed, toddlers may be intrinsically risk-prone in gain context. The question now is to know the driving force behind this risk-prone behavior. The preference for the risky option over the safe option may reflect an exploratory search strategy. Choosing the more

uncertain option provides greater information about the range of possible outcomes in the environment than choosing the safe one (Heilbronner & Hayden, 2013). Hence, risk proneness may be a strategy by which decision-makers explore the outcome space (Real & Caraco, 1986). Exploring a larger payoff distribution may reflect behavioral choices relevant to some environment. Indeed, an exploratory strategy may provide a selective advantage in a dynamic environment (Hills *et al.*, 2008, 2015; Mehlhorn *et al.*, 2015). Some work suggests that favouring exploration rather than exploitation is more prevalent at a young age (cf., Gopnik, 2020). A systematic exploratory behavior is thus described in young children (Blanco & Sloutsky, 2020). It should also be noted that infants display a preference for moderately novel stimuli (see Mather, 2013, for a review). The attractiveness of uncertain rewards could be linked to novelty seeking in human children. An exploratory search strategy may function as a proximal mechanism that increases risk proneness.

We selected capuchins as nonhuman primates subjects in our study since, unlike human children, they display a cautious attitude towards new situations (Sabbatini *et al.*, 2007). Moreover, the review of risk attitudes in this species revealed a complicated picture, with results that are not consistent across studies (cf., Broihanne *et al.*, 2019; De Petrillo *et al.*, 2015; Lakshminarayanan *et al.*, 2011; Pelé *et al.*, 2014; Rivière *et al.*, 2019). Indeed, when faced with a gambling task for food reward, capuchins' behavioral patterns suggest that their attitudes toward risk vary according the experimental setup used. Finally, most studies investigating cognition in nonhuman primates have involved African and Asian monkey species (cf. Many Primates, Altschul

et al., 2020). Comparative research should be also interested in the Central and South American monkey species in order to shed light on the origins and specificities of human gambling behavior. Consequently, the study of capuchin monkeys appears to be critical for understanding the evolution of human decision-making under risk of gain, and its relationship to exploratory behavior. We argue that investigating the impact of attraction toward the unknown and the unexpected on decision-making under risk of gain in both toddlers and capuchins could shed light on mechanisms underlying economic risk proneness.

The present study aims to investigate the role of exploratory behavior on economic choices in toddlers and capuchins. In Experiment 1, participants have to choose between two options with the same expected value, a secure option and a risky option characterized by an unexpected event. The unexpected event associated to the risky option involved two effects: a vanishing of bowls and an appearance of boxes. Assuming that economic risk proneness in young children is driven by exploratory behavior, we expect that toddlers would be risk prone in our gambling task. In Experiment 2, participants were presented with a situation analogous to that used in Experiment 1 except for the fact that the opaque bowl under which was placed the secure option was replaced by a transparent bowl. The purpose of Experiment 2 was to investigate whether economic choices observed in Experiment 1 reflect a failure to inhibit a response towards a salient stimulus.

3.1.3. Experience 1

The goal of the first experiment was to test the hypothesis that exploration behavior is crucial to economic choices in human children and capuchin monkeys. We used a task derived from the gambling task for food reward (Haun *et al.*, 2011). Toddlers and capuchins were presented with an economic choice situation involving gain in which participants had to choose between two options, a secure option and a risky option characterized by an unexpected event. In this economic decision-making task, participants were presented with the choice between accepting risky gambles and taking a sure bet of equal EV. This allowed better discriminating responses based on risk seeking because a rational agent should be indifferent to two options that have the same EV (Von Neumann & Morgenstern, 1944). In order to test participants at the indifference point, all along the trials the probability to obtain the risky reward (P) was 0.25 and the relative value of the reward (V) was four. This way, EV was equal to one. Assuming that exploration behavior drives economic choices in toddlers and capuchins, we expected more risky responses than safe responses.

3.1.3.1. Child study

3.1.3.1.1. Participants

We tested 24 children (mean age: 2 years 9 months \pm 2 months 2 days; 12 girls). These children were from a middle-class socioeconomic background. They were from an urban setting and were recruited from day-care centers in France. Parents gave written, informed consent prior

to the start of the study. Children's assent was obtained by asking them if they wanted to play a game.

3.1.3.1.2. Apparatus and procedure

Children were individually observed in an isolated room. They were tested just before lunch to ensure that everyone was equally motivated toward food. All children were presented with the paradigm as follows (see Figure 1). Faced with the subject, the experimenter placed five bowls (four blue bowls and one green bowl, see Figure 2). All bowls were placed on a table in a row at 10 cm apart from each other and, at an equal distance of 20 cm from the subject to ensure that the bowls were reachable. A red box was hidden under each blue bowl. The green bowl was always placed at one of the extremities of the row. The child was seated facing the experimenter and was first allowed to familiarize themselves with the experimenter and the setup. During the familiarization phase, participants were introduced to the apparatus. The experimenter focused the attention of the child on the five bowls. Children were allowed to just look at them. No warm-up trials were used. After the familiarization procedure, the experimenter placed an opaque screen to hide the four blue bowls from the child's view. The experimenter then simultaneously placed two cups on top of the screen: one contained a single chocolate chip and the other one contained four chocolate chips. After two seconds and checking that the child has seen both cups, the experimenter always placed the cup with the single chocolate chip under the green bowl visually accessible by the child (secure option) and the cup with four chocolate chips was

displaced behind the opaque screen. Afterwards, the experimenter, ensuring that the child has not seen the manipulation, uncovered the four red boxes and placed the blue bowls on the built-in shelf of the screen. Once this manipulation was done, the experimenter hid the cup with four chocolate chips under any of the four red boxes hidden by the screen (risky option). The small reward was always hidden under the green bowl providing a colour cue identifying the safe option whereas the large reward was always hidden under a red box placed behind the screen. Finally, the experimenter removed the screen and asked the child to choose an option among those available by pointing one of the covers. The instructions that were verbally given to the children were as follows “Show me the cup you want”. The new and unexpected event associated to the risky option involved two effects: a vanishing (of blue bowls) and an appearance (of red boxes). This study was not preregistered. Data have been included as supplemented materials.

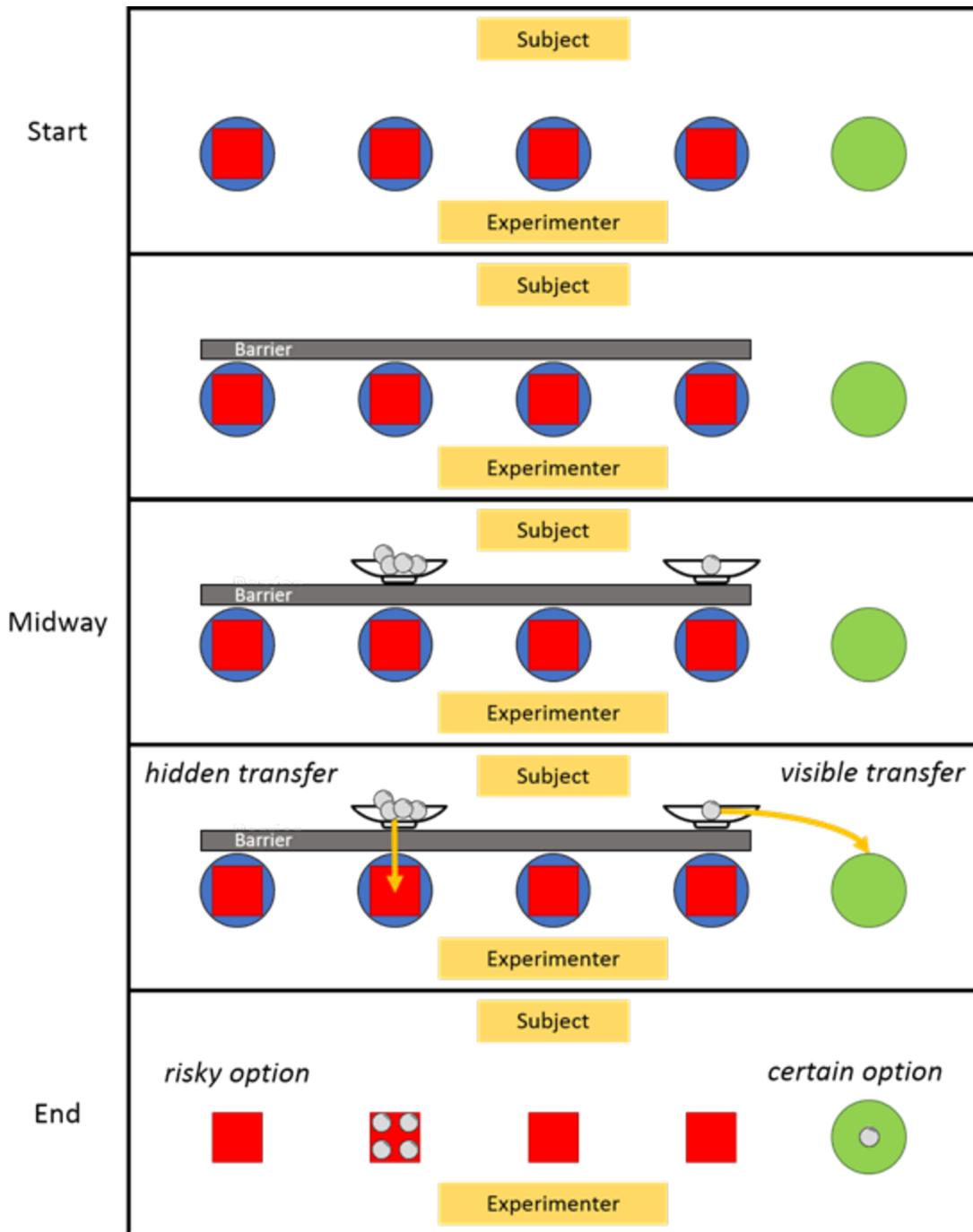


Figure 4 : Schematic drawing of the test phase of the procedure



Figure 5 : Experimental set-up of the gambling task presented to children

To measure children's risk preference, only two test trials were performed in order to capture subjects' spontaneous responses to our gambling task. It is important because repeated-trials procedure bias participants toward risk-seeking (Heilbronner & Hayden, 2013). All children passed two consecutive test trials. The intertrial interval was 30 s. The green bowl was always placed at one of the extremities of the row. The position of the green bowl (left or right of the child) was balanced within and between participants. The order in which secure and risky options were hidden (safe first or risky first) was also balanced within and between participants. Each trial ended when the child pointed at a cover or after 60 s if no choice occurred. The experimenter raised the cup pointed to by the child. If the cup pointed to by the child revealed the reward, the experimenter gave the child the chocolate chips.

3.1.3.1.3. Coding and data analysis

All sessions were videotaped. To check the reliability of scoring, choices of half of the participants were coded by a second observer. The agreement of both observers on children's choices was perfect (Kappa = 1, $p < .001$). The dependent variable was the proportion of choices of the risky option.

3.1.3.1.4. Results

Of the 24 children, 20 preferred the risky option on both test trials, two preferred the risky option on the first test and preferred the safe option on the second test, and two preferred the safe option on the first test and preferred the risky option on the second test. Of the 22 children who preferred the risky option on the first test, six found the large reward. To evaluate whether children preferred either option, we aggregated the two trials and we compared with chance level (*i.e.*, 50%). As shown in Fig. 3, children significantly preferred the risky option (Wilcoxon signed-rank test: $Z = -4.472$, $p < .001$, $r = 0.913$). McNemar's test of paired samples indicated that the difference between performance on the first trial and the second trial was not significant ($\chi^2_{(1, N=24)} = 0.02$, $p = .88$).

3.1.3.2. Capuchin study

3.1.3.2.1. Ethical note

The experimental procedure complied with the current French laws and the European directive 10/63/UE regarding the protection of animals used for scientific purposes. According to article 3 (definitions) of the current European directive, this experiment, which only included behavioral observations, routine training, and non-invasive contact with the monkeys (giving food rewards), did not require institutional ethics approval. The experimental procedure was conformed to the current guidelines (ASAB/ABS, 2020). Subjects could choose to stop participating at any time. All subjects were habituated to testing procedures and isolation during testing. They were familiarized with the experimenter. All tests were carried out without food or water deprivation and motivated by positive reinforcement.

3.1.3.2.2. Subjects

Seven tufted capuchin monkeys (*Sapajus apella*, two females) ranging in age from 5 to 19 years (mean age: 9 years 3 months \pm 5 years and 5 month) participated in this study (for details, see Table 1). An additional capuchin had to be excluded because of some signs of inattention. All subjects were housed at Primatology Research Center of Strasbourg University, France and were born in captivity. Five of the seven subjects live in a large social group of 17 individuals (eight females) ranging in age from 1 to 19 years. The whole group live in semi-free ranging conditions, in a large wooded park (2,332 m²) with constant access to a heated indoor shelter (24°C \pm 4°C,

16.21m² and 2.74m high) where the light follows a 12/12 h light/dark cycle (the light is on from seven am to seven pm). The two other subjects were housed in an indoor-outdoor enclosure (outdoor: 6,1m² and 3,43m high; indoor: 9,80m² and 2,84m high). All capuchins were fed with commercial primate pellets once a day, and with fresh fruits and vegetables once a week. Water was available ad libitum for all individuals.

3.1.3.2.3. Apparatus

All capuchins were tested individually in an experimental room allowing visual and auditory contact with their social group. On the "subject" side (inside the experimental room), the subject sat facing the experimenter on a wooden stool (95 X 45 X 2 cm) fixed to the grid 67 cm above the floor. On the "experimenter" side (outside the experimental chamber), a steel shelf (90 X 70 x 1.5 cm) was fixed at 90 cm from the floor on which a sliding wooden board (110 X 60 X 5 cm) was placed. The bowls, boxes and screen used were standardised to ensure that the test conditions were the same for all subjects. All the bowls were 15 cm in diameter and 10 cm high and the red boxes were 10 cm in diameter and five cm high. Similarly, the screen used to hide the risky option was 40 cm high X 90 cm long X 40 cm deep, the screen used to hide the safe option was 40 cm high X 25 cm long X 40 cm deep.

3.1.3.2.4. Procedure

3.1.3.2.4.1. Pre-tests

Before presenting the test, we ensured that all animals were able to indicate their choice and to discriminate quantities. Therefore, we administered two pre-tests, namely, the pointing task and the discriminatory task.

3.1.3.2.4.2. Pointing task

All subjects had previously participated in tasks involving pointing, so they knew how to indicate their choices (Rivière *et al.*, 2019). A routine training was conducted to ensure that all subjects remembered the use of the pointing gesture. During this program, the experimenter placed on the sliding table four white bowls (10 cm apart from each other), in front of and in full view of the subject but at an unreachable distance. A piece of grape was hidden under one bowl. The location of the food was counterbalanced between trials. Subjects completed three sessions of six trials. Capuchins correctly pointed out the place where the piece of grape was hidden (95% correct performance; binomial test, $p < .0001$).

3.1.3.2.4.3. Discriminatory task

A pre-test was administered to ensure that all capuchins were able to discriminate between one piece of grape and four pieces of grape. Two green bowls were placed by the experimenter on the sliding table (10 cm apart from each other) in front of the subject's eyesight

and out of reach. A piece of grape and four pieces of grape were placed under the bowls. The location of food placement was counterbalanced across trials. Subjects completed three sessions of six trials. Capuchins correctly discriminated between the two food quantities (96.29% correct performance; binomial test, $p < .0001$).

3.1.3.2.4.4. Test

Capuchins were tested before feeding in order to ensure that all of them were similarly motivated toward food. All capuchins were presented with the paradigm as follows. The experimenter faced the subject and placed five bowls, four blue and one striped green bowl, in a row on the sliding board (10 cm apart from each other, see figure 4). The striped green bowl was always placed at one of the extremities of the row. All bowls were then simultaneously hidden using two screens, the four blue bowls with a blue screen and the striped green bowl with a white screen. Inside the blue screen and on a built-in shelf, the four red boxes were placed (without the subject seeing it). Afterwards, the experimenter presented the subject with his two open hands on top of the screen, one containing a single piece of grape and the other containing four pieces of grape. After two seconds and checking that the capuchin has seen both quantities, the experimenter always placed the single piece of grape behind the white screen and under the striped green bowl (secure option) and the four pieces of grape were displaced behind the blue screen. Afterwards, the experimenter, ensuring that the capuchin had not seen the manipulation, uncovered the four red boxes and placed the blue bowls on the built-in shelves of the screen. Once this manipulation was done, the experimenter hid the four pieces of grape under any of the

four red boxes hidden by the screen (risky option). Finally, both screens were removed. Each trial ended when the capuchin pointed at a cover or after 60 s if no choice occurred. When the bowl revealed a reward, the experimenter would directly give it to the subject, otherwise, no reward was given. If the subject exhibited any signs of stress (e.g., loud calls, restlessness or stereotypies associated with heightened arousal) or attempts to get out of the experimental room (e.g., by pulling the cable linked to the external pulley), the test was instantly stopped, the current trial was cancelled, and the session restarted the next day. As in the child study, the unexpected event associated to the risky option involved two effects: a vanishing (of blue bowls) and an appearance (of red boxes).



Figure 6 : experimental set-up of the gambling task presented to capuchin monkeys

A recent study (Rivière *et al.*, 2019) showed that, unlike human children, capuchins privilege visual access of the reward value at the expense of the other type of information. We placed a screen in front of each option so that this attentional mechanism does not constitute a bias in our experiment. Eye contact with the secure option was interrupted to ensure that capuchins' choices were not merely a consequence of the focus on the attention to a highly salient stimulus (i.e., the safe option that is fully visible). In capuchins, our sample size was relatively small: seven subjects. We doubled the number of trials for capuchins in order to ensure the stability of their response patterns.

Each subject completed four consecutive trials. The intertrial interval was 30 s. The position of the striped green bowl (left or right of the capuchin) was balanced within and between participants. The order in which secure and risky options were hidden (safe first or risky first) was also balanced within and between participants. To exclude the possibility that inadvertent cues from the experimenter might influence capuchins, the experimenter very consciously controlled both his eye gaze and his posture. Thus, the experimenter moved only when presenting the rewards and never directly looked at the subject or the bowl hiding the reward. The entire apparatus was also filled with the smell of grapes before the test phase.

3.1.3.2.5. Coding and analysis

All tests were videotaped and two Canon® LEGRIA HF S20 and HF S200 cameras were used. A second observer, who was unaware of the study design and hypothesis, independently coded 75% of all trials. The agreement of both observers on capuchins' choices was excellent ($k = 1, p < .001$). The dependent variable was the proportion of choices of the risky option.

3.1.3.2.6. Results

To evaluate whether capuchins preferred either option, we aggregated the four trials and compared the proportion of choices for the risky option with chance level (*i.e.*, 50%) using a non-parametric alternative to the single sample *t* test. As shown in Fig. 5, capuchins significantly preferred the safe option ($Md = 0, n = 7$) over chance (Wilcoxon signed-rank test: $Z = -2.33, p = .02, r = 0.881$). The Cochran Q test for multiple paired samples found no significant difference between the trials ($Q_{(3, N=7)} = 4.71, p = .19$).

3.1.3.2.7. Discussion

In Experiment 1, toddlers and capuchins were presented with the choice between two options with the same expected value, a secure option and a risky option characterized by an unexpected event. Findings indicate that, in contrast to capuchins, toddlers show a strong preference for the risky option over the safe option. Moreover, they showed no changes in choices across trials.

In the present task, 20 children preferred the risky option on both trials, and four showed inconsistent preferences. The Wilcoxon signed rank test shows that the data are not consistent with the null hypothesis that children are homogenous and that they each have a chance of being risk-prone half of the time. The other aspect of the data that argues against the null hypothesis is that there are only four children who showed mixed behavior. If children were homogeneous and the probability of being risk-prone across trials was 0.5, 12 children would be expected to show mixed behavior, rather than four. That is why we argue that children's performance in the present task reflected an enduring bias for risk-prone choices.

In Experiment 1, five capuchins preferred the secure option on all trials, and two showed inconsistent preferences (one preferred the risky option on the first test and preferred the safe option on the three other tests, and one equally selected both options on all trials). The Wilcoxon signed-rank test shows that the data are not consistent with the null hypothesis that capuchins behave similarly and that they each have a chance of being risk-prone half of the time. Another argument against the null hypothesis is that only two subjects presented a mixed profile. If capuchins behaved similarly and the probability of being risk-prone across trials was 0.5, we should have observed three or four capuchins showing inconsistent preferences. Therefore, we argue that most capuchins select the safe option in the present task by choice, not by chance.

It could be hypothesized that inhibitory control difficulties influenced economic choices observed in Experiment 1. Indeed, the salience of the new boxes presented with the risky option

could play a key role in our task. As a result, economic risk sensitivity in participants could reflect a failure to inhibit a response towards a salient stimulus. To test this hypothesis, the secure option took the form of a highly salient stimulus in a second experiment.

3.1.4. Experience 2

The purpose of Experiment 2 was to investigate whether economic choices observed in toddlers and capuchins monkeys in Experiment 1 reflect the salience of the new boxes presented with the risky option. If such salience plays a key role, participants should be unable to inhibit a response towards a highly salient stimulus (i.e., a fully visible reward). In contrast, if such salience plays a minor role, young children should display the same risk propensity that was observed in Experiment 1. If risky choices observed in Experiment 1 are due to the salience of the new boxes associated with the risky option, visual access to the secure option should increase the salience of the safe option, thus decreasing risky responses. Participants were presented with a situation analogous to that used in Experiment 1 except for the fact that the bowl under which the secure option was placed was transparent.

3.1.4.1. Child study

3.1.4.1.1. Participant

We tested 23 children (mean age: 2 years 7 months 20 days \pm 1 month 15 days; 11 girls). The participants were not the same children tested in Experiment 1. These children were from a

middle-class socioeconomic background. They were from an urban setting and were recruited from day-care centers in France. These children were presented with a situation that was analogous to the task used in Experiment 1 except that the opaque bowl covering the safe option was replaced by a transparent bowl. Parents gave written, informed consent prior to the start of the study.

3.1.4.1.2. Results

Of the 23 children, 21 preferred the risky option on both test trials, one preferred the risky option on the first test and preferred the safe option on the second test, and one preferred the safe option on both test trials. Of the 22 children who preferred the risky option on the first test, six found the large reward. As shown in Fig. 3, children significantly preferred the risky option in Experiment 2 (Wilcoxon signed-rank test: $Z = -4.264$, $p < .001$, $r = 0.889$). McNemar's test of paired samples indicated that the difference between performance on the first trial and the second trial was not significant ($\chi^2(1, N=23) = 0.36$, $p = .55$). As shown in Figure 3, there is no significant difference between the proportion of choices of the risky option in Experiment 2 and that observed in Experiment 1 (Mann-Whitney U test: $U = 296$, $p = .462$, $r = 0.107$).

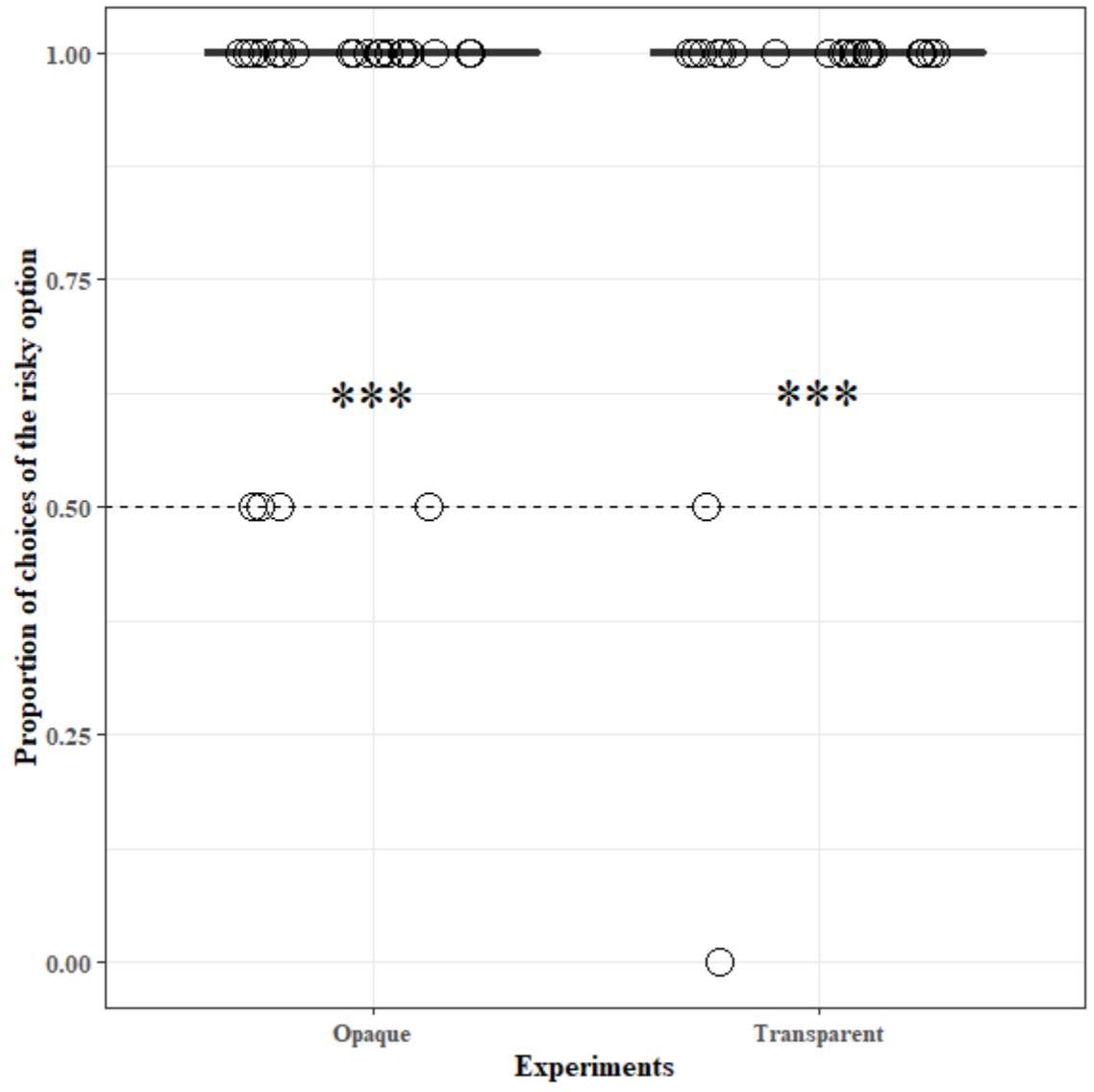


Figure 7 : Children's risk preferences. Aggregate scores across experiments (opaque or transparent cover on the safe option) are indicated. Each dot represents one subject. The dashed line depicts the chance level. *** $p < .001$

3.1.4.2. Capuchin study

3.1.4.2.1. *Subjects and procedure*

All subjects were the same as in Experiment 1. They were facing a similar situation to the task used in Experiment 1 except that the opaque bowl covering the safe option was replaced by a transparent bowl.

3.1.4.2.2. *Results*

As shown in Fig. 5, all capuchins selected the safe option on all trials. The Cochran Q test for multiple paired samples found no significant difference between the trials ($Q(3, N = 7) = 3, p = .39$). As shown in Fig. 5, capuchins' choices did not significantly differ between Experiment 1 and Experiment 2 (Wilcoxon signed-rank test: $Z = -1.34, p = .18$).

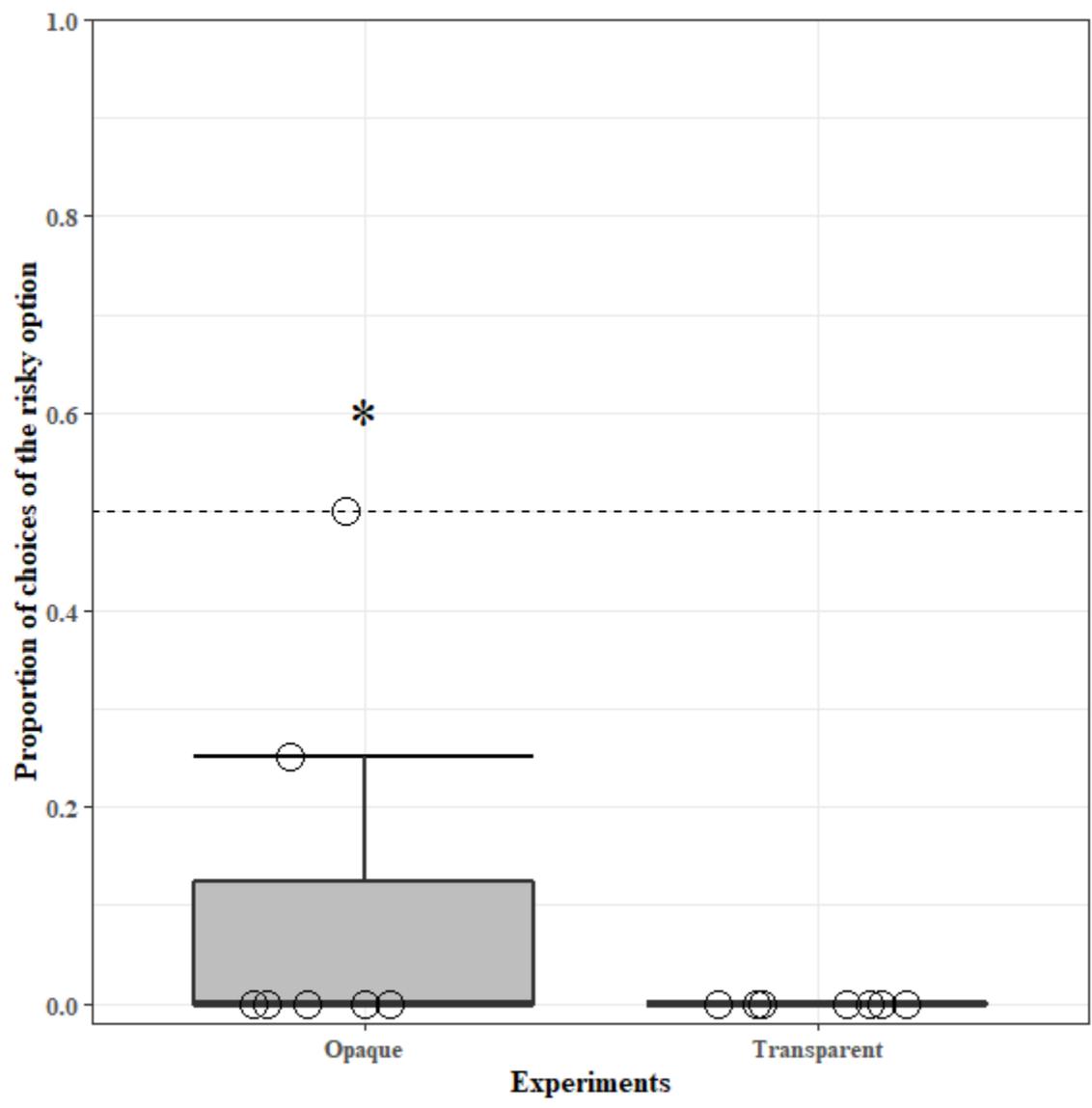


Figure 8 : Capuchins' risk preferences. Aggregate scores across experiments (opaque or transparent cover on the safe option) are indicated. Each dot represents one subject. The dashed line depicts the chance level. * $p < .05$

3.1.4.2.3. Discussion

The purpose of Experiment 2 was to investigate whether economic choices observed in Experiment 1 reflect the salience of the new boxes presented with the risky option. Replacing an opaque cover under which the secure option was placed by a transparent cover did not decrease the choice of risky options in young children. Indeed, toddlers still exhibited a strong preference for the risky option. In contrast to toddlers, capuchins still preferred to choose the safe option in this second experiment. We argue that these findings point to species differences about the role of uncertainty-driven exploration in decision-making under risk of gain.

3.1.5. General discussion

The general objective of the present study was to gain a better understanding of the cognitive processes underlying the mechanisms and evolution of economic behavior and economic risk proneness. A recent study (Rivière *et al.*, 2018) suggests that, by the age of 2.5 years, human children may be intrinsically risk-prone in a gain context. The present study focuses on the psychological motivations that underlie toddlers' risk proneness. The primary aim of the current comparative study was to investigate the role of exploratory behavior on economic choices in young children and capuchin monkeys. In Experiment 1, toddlers and capuchins were presented with the choice between two options with the same expected value, a secure option and a risky option associated to an unexpected event. In Experiment 2, we increased the salience

of the safe option. Toddlers chose the risky option associated to an unexpected event across both trials and experimental conditions. These findings raise the possibility that risk-prone choices that are displayed by young children in gain context are exploratory decisions. Indeed, toddlers' choices in our task can be characterized by an uncertainty-driven exploration. In other words, children may choose the risky option in order to reduce the uncertainty. Such an account may explain why toddlers are intrinsically risk-prone in gain context (cf. Rivière et al, 2018).

The binary choice situation used in the present study could be characterized as a representation of the trade-off between exploitation and exploration. In this paradigm, exploitation could be defined as choosing the option that has the greater certainty, while exploration is defined as opting for greater uncertainty. In other words, participants are faced with a dilemma between exploiting the certain reward versus exploring the risky option to get a better reward. The exploration-exploitation trade-off is an explanatory framework used to understand many aspects of behavior of humans and other animals (Hills *et al.*, 2015). In this perspective, exploitation is assumed to provide a desired outcome while exploration is assumed to provide the agent with the opportunity for gathering new information about other, perhaps better, outcomes (Mehlhorn *et al.*, 2015). In many real-life situations, the decision to explore new alternatives increases the chance to find potentially better options. In this explanatory framework, young children chose the risk of exploring the option with high uncertainty against the safety of exploiting the option with high certainty. In addition to giving an insight into the nature of the choice that toddlers make in our situation, the trade-off between exploitation and

exploration may also help us understand more about the mechanisms that underlie their propensity to take risks in the gain domain.

In contrast to toddlers, capuchins showed a strong preference for the safe option over the risky option in both experiments. Such results fit well with Lakshminarayanan *et al.*'s (2011) and Pelé *et al.*'s (2014) observations, indicating that capuchins display a behavioral preference for the safe options in some contexts. Taken together, these findings suggest that children's economic choices are driven by different mechanisms than those of capuchins' economic decisions. We argue that exploratory behavior plays a key role in shaping economic choices in toddlers. Exploration is critical for understanding our environment especially in young children who have little knowledge of the world (Blanco & Sloutsky, 2020). Hence, the informational value of exploring may be privileged in toddlers' choice strategies. That is why children chose in our task actions whose consequences were uncertain. The attraction toward the unknown and the unexpected does not appear to play the same role in capuchins' economic choices. In Rivière *et al.*'s (2019) study, capuchins were facing a similar situation to the task used in Experiment 1 except for the fact that the blue bowls did not disappear. Capuchins were risk-neutral in this experimental set-up. In Experiment 1 of the present study, in which the blue bowls disappeared and red boxes appeared in their place, capuchins were risk-averse. In our task, capuchins' response patterns are consistent with studies showing capuchins' cautious attitude towards new situations (e.g., Sabbatini *et al.*, 2007). We argue that an exploitation strategy of known and safe options, and not an exploratory search strategy driven by uncertainty as observed in children,

may guide capuchins' economic choices. It should be noted, however, that in our situation the unexpected event associated to the risky option may have provided an excessive level of novelty for capuchins. It is possible that an optimal level of novelty entails different response patterns to those observed in capuchins in the present study. Capuchins' behavior in Experiment 2 (with the transparent bowl) could also have reflected a prepotent attraction to visible food, rather than a particular decision-making strategy related to risk. The current study alone cannot rule out this hypothesis. Human exhibit developmental change in risk preferences. Children, unlike adults, usually prefer risky options in the gain domain (Harbaugh *et al.*, 2002; Paulsen *et al.*, 2011; Rivière *et al.*, 2018; Van Leijenhorst *et al.*, 2010; Zhu *et al.*, 2016). Thus, it could be possible that in our study the differences between capuchins and toddlers are due to the fact that capuchins were all adults. It should be noted, however, that recent studies of capuchin risk preferences have not found major age-related changes (De Petrillo *et al.*, 2015; Rivière *et al.*, 2019). By testing juvenile monkeys, future research might investigate to what extent the differences between capuchins and toddlers that were observed in our experiments reflect a difference in the life-history stage of our subjects. For a full understanding of the differences between human children and other primates, it is necessary to gain more information about how monkeys on the brink of weaning (about 1.5 years in capuchins) perform in our experimental design. Finally, we did not counterbalance the order of experiments in capuchins. Indeed, all the capuchins received Experiment 1 before Experiment 2 and already preferred the safe option. Future research should aim to address this limitation by counterbalancing this aspect of the experimental design.

It would also be interesting to examine in greater depth the nature of the connections between exploratory search strategies and risk proneness. We argue that risk proneness may be an option associated to the initial stages of an exploratory search strategy. Such analysis raises the questions as follows: Can risk proneness displayed by some primate species on studies using hundreds of trials per day still be considered an exploratory search strategy? Are there other exploratory search strategies displayed by primates within the context of economic risk? Future studies will be needed to investigate these questions.

How human beings make decisions has long been a central question within economics. Comparative cognition sheds light on this question insofar as animals also make economic decisions (Hayden, & Walton, 2014; Kalenscher & van Wingerden, 2011; Santos & Hugues, 2009). In this perspective, economic choices in primates are viewed as having been shaped by natural selection over millions of years of biological evolution. In the present study, interspecific differences in risk preferences have been observed between young children and adult capuchin monkeys. Our analyses indicate that children and adult capuchins differ in their strategies of choice with toddlers overweighting the value of information gained through exploration and capuchins privileging the exploitation of safe options. We argue that economic risk proneness in young children reflects strong exploratory motivations. In our view, toddlers' risk-prone choices might relate to willingness to gather new information relative to their environment. We argue that capuchins' risk aversion that was observed in Experiment 2 reflects an exploitation strategy of known and safe options. Further comparative studies are needed to advance our

understanding of how economic preferences are generated and how value-based decision-making evolves.

3.2. Étude 2

Economic risk proneness in middle childhood: uncertainty-driven exploration or novelty-seeking?

Anthony Roig¹, Régis Thouvarecq², James Rivière¹

¹Centre for Research on Psychological Functions and Disorders (CRFDP) Scientific Team (UR 7475), Univ Rouen Normandie, F-76000 Rouen, France

²CETAPS Lab (UR 3832), Univ Rouen Normandie, F-76000 Rouen, France

3.2.1. Abstract

While economic risk proneness is usually observed in young children, little is known about how this preference changes across development or about how novelty and uncertainty interact in motivating children's economic choices. This study investigated the developmental trajectory and the mechanisms underlying attitude toward risk in the gain domain between 7 and 9 years of age. A total of 225 7- to 9-year-olds were presented with a series of gambling tasks in which participants have to choose between two options with the same expected value, a certain option and a risky option. Among the three tasks proposed to participants, an unexpected event was associated to the risky option in one task and to the safe option in another one. By revealing that children become less prone to uncertainty in gain contexts between 7 and 9 years of age, our results indicated a decrease in economic risk proneness at the entry into middle childhood. Our

findings also showed that 7- to 9-year-olds choose more the novelty option when it is associated to risk than associated to safety. We suggest that economic risk proneness in young children is driven more by uncertainty exploration than by novelty-seeking.

3.2.2. Introduction

In behavioral economics, risk is associated with variability in possible consequences of his own choices. When exposed to a choice between small, certain rewards and large, uncertain rewards, individuals are said to be risk-prone when they choose the option with higher payoff variance. A key area of mutual interest for economists and psychologists is about the mechanisms underlying economic risk sensitivity. Two questions of particular interest are as follows: What is the developmental trajectory of economic preferences? What are the determinants of economic choices? Developmental studies have shown age-related differences in economic risk sensitivity (e.g., Defoe *et al.*, 2015; Weller *et al.*, 2011). In contrast to adults, children make risky choices in the gain domain (Harbaugh *et al.*, 2002; Levin & Hart, 2003; Paulsen *et al.*, 2012; Paulsen *et al.*, 2011; Rivière *et al.*, 2018; Van Leijenhorst *et al.*, 2010; Zhu *et al.*, 2016). The question of the temporal shift in risk preferences is still under investigation. In their seminal study, Harbaugh and collaborators (2002) reported a decrease in willingness to make risky choices between the ages of 5 and 21 years. These authors attributed these developmental changes in risk sensitivity to the accumulated experience evaluating risks (Harbaugh *et al.*, 2002). More recently, Paulsen *et al.* (2011) observed that, in contexts characterized by a high risk level, 6- to 7-year-olds are more likely to take the risky than the safe option compared to 14- to 15-year-olds. Levin and

collaborators (2007) showed that even 9- to 11-year-olds make more risky choices in the gain domain than adults. It is worth noting that Sutter *et al.* (2013) found no age effects on risk preference in their age group of 10- to 18-year-olds. Taken together, these studies suggest that the shift in risk-based decisions is not a continuous process during development, but instead occurs before adolescence. In the gain domain, the cross-over from risk-seeking to risk-averse behavior may occur between the ages of 7.5 and 11 years (Paulsen, Platt, *et al.*, 2012).

Little is known about the processes underlying the evolution of decision-making under risk of gain in childhood. In particular, the determinants of risky choices in young children remain underspecified. Curiosity-driven exploration has been evoked to account children's risky choices on tasks with immediate outcome feedback on rewards (Kidd *et al.*, 2015; Rolison *et al.*, 2022). Since Piaget (1952), curiosity-based exploration is considered as a fundamental mechanism in children's cognitive development (e.g., Kidd & Hayden, 2015; Liquin & Gopnik, 2022). Insofar as curiosity-directed behavior aims to (i) gain new information about the world and / or (ii) reduce uncertainty about states of the world (Bonawitz *et al.*, 2012; Liquin & Lombrozo, 2020; Litman, 2007, 2008; Ruggeri *et al.*, 2016; Schulz & Bonawitz, 2007), it could lead to a risk-seeking tendency (Rolison *et al.*, 2022). Another intrinsic motivation mechanism for economic risk proneness may be novelty-seeking. The existing evidence for novelty-seeking in infancy is strong (cf. Mather, 2013). Thus, in young children, the attractiveness of uncertain reward could be linked to its novelty (Nussenbaum *et al.*, 2022). It should be noted, however, that curiosity and novelty are difficult to dissociate because they are linked (cf. Twomey & Westermann, 2018).

A recent study has suggested that exploratory behavior drives economic risk proneness in young children (cf. Roig *et al.*, 2022). In Roig *et al.*'s (2022) study, 2.5-year-olds had to choose between one safe cup and one to four risky cups associated to an unexpected event, where only one risky cup contains the reward. Toddlers showed a preference for the risky option despite the high level of novelty associated with it. Roig *et al.* (2022) suggested that toddlers' risk proneness in the gain domain reflects an uncertainty-driven exploration. However, in Roig *et al.*'s (2022) study, uncertainty exploration and novelty-seeking were confounded among the processes underlying risky choice. Difficulties to disentangle these components have also been observed in children aged 8 – 10 years (cf. Nussenbaum *et al.*, 2022). As such, there exists a need to: (a) gain information about age-related changes in risk preferences; and (b) identify the mechanisms underlying developmental differences in decision-making under risk of gain. The goal of the present study is to examine the developmental trajectory and the mechanisms underlying attitude toward risk in the gain domain between 7 and 9 years of age. More precisely, our study aims to tease out differences in uncertainty exploration and novelty-seeking during this period of time.

3.2.3. Material and method

3.2.3.1. Participants

We recruit 225 children ages 7 to 9 years (mean: **8.03 ± 0.92**) from leisure center. All of these were from an urban setting and a middle socioeconomic background. This study consists of three

conditions (more detailed in 2.2) with 75 participants each (see table1). Prior to the beginning of the study, all parents were advised that their children would take part in a gambling game experiment. A comprehensive explanation of the experiment was provided, as well as a signed consent for their children's participation. We also gave them a document that included our explanations and a retraction request if, at any point in the experiment, they chose (or their children) not to participate. Before the experiments began, we also asked the children if they would like to play a gambling game where they could win chocolate token.

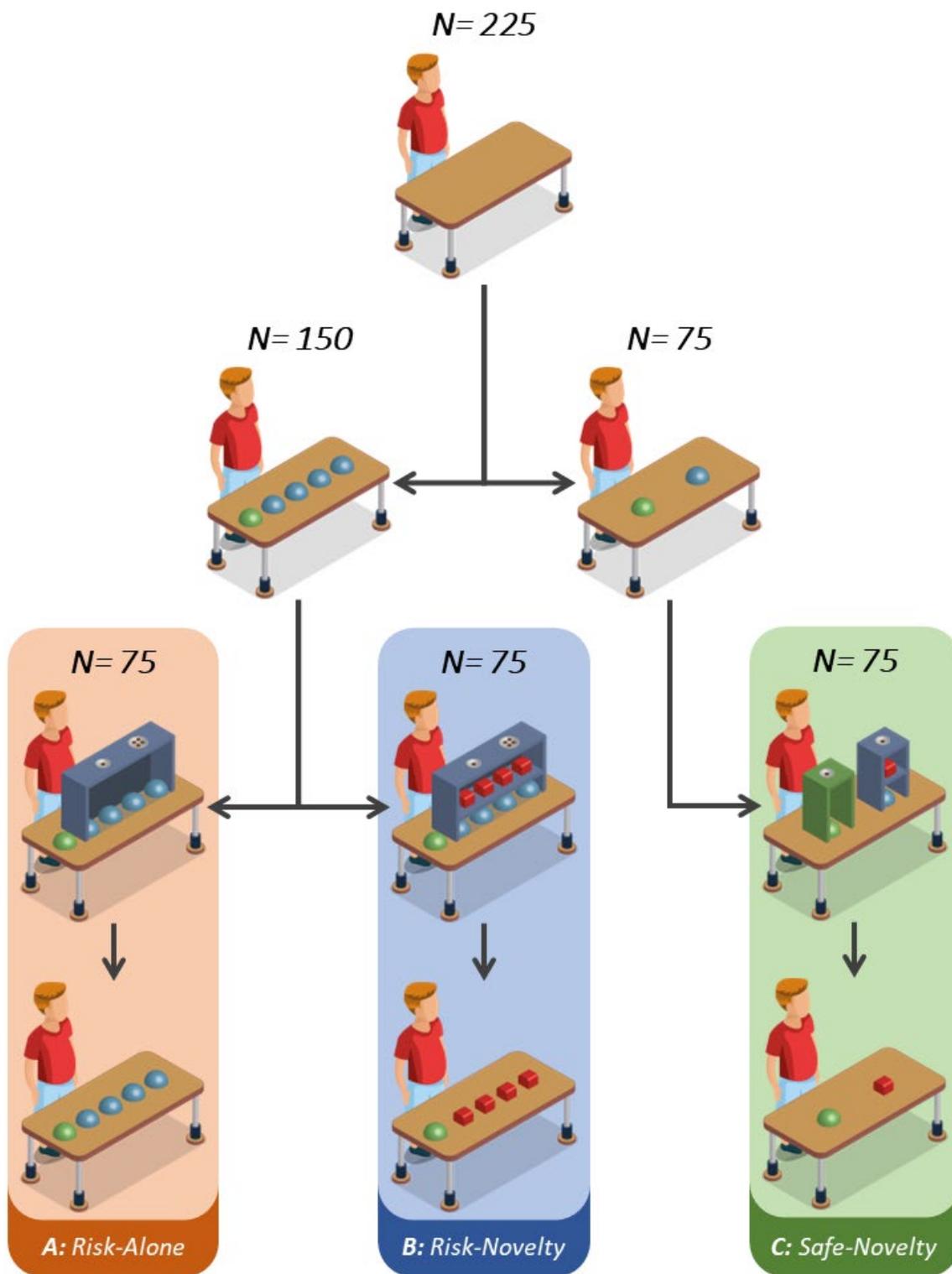
Table 1:

Average age and number of participants by gender in each condition and in the whole experiment

Condition	Gender	N	Mean age(\pm SD)
Risk-alone		75	8.003 (\pm 0.915)
	Girl	34	8.201 (\pm 0.825)
	Boy	41	7.839 (\pm 0.962)
Risk-novelty		75	8.042 (\pm 0.974)
	Girl	31	7.745(\pm 0.866)
	Boy	44	8.252(\pm 1.001)
Safe-novelty		75	8.053 (\pm 0.893)
	Girl	38	8.025(\pm 0.957)
	Boy	37	8.083(\pm 0.835)
Total		225	8.033 (\pm 0.924)
	Girl	103	7.999 (\pm 0.898)
	Boy	122	8.062 (\pm 0.948)

Figure 9:

Schematic representation of the three conditions and the participants' distribution. A total of 225 participants participated in this experiment; 150 were assigned one of the risky tasks (five bowls), and 75 were assigned the safe-novelty task (i.e., 2 bowls). A) Risk-Alone: A screen was placed over the risky option. The experimenter hides the small reward under the green bowl and the large reward under one of the blue bowls of the risky option. The screen was removed, and the participant make a choice. B) Risk-Novelty: When the screen was placed, the experimenter discreetly switched the four blue bowls of the risky option with four red boxes. The procedure remains the same as A. C) Safe-Novelty: Two screens were placed over one green and one blue bowl. The experimenter hides a little reward under each bowl, he discreetly switched the blue bowl with a red box. Then the screens were simultaneous removed and the participant make a choice.



3.2.3.2. Apparatus and Procedure

All children did the experiment in an isolated room. They were tested before the lunch or the afternoon snack, to ensure an equal motivation toward chocolate token. This study was composed of three experimental conditions, two were risk-taking conditions, (i) *Risk-Along* and (ii) *Risk-Novelty (Figure.1 A & B)*, the last one was a safe condition, (iii) *Safe-Novelty (Figure.1 C)*. Only one of the experimental conditions is performed on a single subject. In all conditions, each child stood facing the experimenter and between them was the experimental apparatus placed on a table. Hence, in front of each child, the experimenter placed a row of bowls on the table at 10 cm apart from each other and at a reachable distance of 20 cm from the child. Each bowl sized 15 cm diameter, 10 cm height. Each child was instructed by the experimenter that they're going to play a game in which they could win chocolate tokens by choosing only one bowl from two types of colored bowls (*i.e.*, green or blue) and among a number available on the table (*i.e.*, 2 or 5).

Risk-taking conditions (i.e., Risk-alone and Risk-novelty) were conducted as follows: As soon as the experimenter placed the row of bowls, a screen was placed over the risky option (*i.e.*, blue bowls). Next, the experimenter shows the child two cups, one containing a chocolate chip and the other four. The experimenter then hides the small amount under the safe option and the large amount under the risky option. During this step, only for the *Risk-Novelty* condition, a "magic trick" was performed. Thus, the experimenter discreetly switched the four blue bowls of

the risky option with four red boxes. Finally, the screen was removed, and the participant was asked which bowl/boxes he or she wanted to choose. The *Safe-Novelty* condition was a control condition aiming to test the effect of the novelty on the choice without the presence of risk. In this condition, the experimenter placed two bowls on the table, one blue and one green, both corresponding to a safe choice. Then two screens were placed above these options and two cups, containing only one chocolate token, were presented. Each of these two cups was hidden under a bowl and during this time, as in *Risk-Novelty* condition, the experimenter discreetly switched the blue bowl with a red box. As a final step, both screens were simultaneously removed and the child was asked to choose one bowl. In the whole study only two trials per condition, were conducted to ensure a spontaneous response from participants, to avoid the bias induced by repeated trials on risk taking and that the novelty remains novel. Each trial ended after the participant chose a bowl or if they wanted to stop, and the assessment ended after completing two trials or if they wanted to stop. The position of the choice options and the hiding order of the rewards were counterbalanced within and between children to avoid positional preferences. The amount of hidden chocolate token was defined by computing the expected value (EV) of each possible choice. Based on multiplying the probability of success by the reward (*i.e.*, $EV_{(X)} = P \times V$), this value represents the average expected gain if the situation were replayed. Hence, the winning likelihood of the risky reward was 25% ($P_R = 0.25$) and its value was four, while the safe one was 100% ($P_S = 1$) and the value was one. Consequently, in both risk conditions the expected value was equal ($EV_R = 0.25 \times 4 = 1$; $EV_S = 1$) between choice option. In these conditions, as is common in risk proneness studies, a safe fixed reward was opposed to a risky bet with the same

expected value to ensure a better discrimination of risk-based choices, since a rational decision maker would be indifferent to two options with the same EV.

3.2.3.3. Data collection, scoring and Statistical analysis

All choices sessions were videotaped. To test the reliability, two experimenters independently coded 20% of videos. The agreement of both experimenters on children's choices was almost perfect ($\kappa = 1$, $Z = 7.28$, $p < .001$). We scored whether the subject chose the outcome of interest in each experiment. For *Risk-Along* and *Risk-Novelty* experiments, the outcome of interest is the risky option. For *Safe-Novelty*, this outcome is the novelty-oriented choice. As such this scoring result in a binary (*i.e.*, 0: non-risky/non-novelty; 1: risky/novelty) variable for each trial. In each *Risk-alone* and *Risk-novelty* trials, the score was related to the choice for risk. In the *Safe-Novelty* the score was the choice for the novelty.

All data, analyses were performed using R software (version 4.2.1). To take in account the risky propensity of each condition. We first performed a *McNemar Test* to determine if the data could be aggregated across trials. Follow up this, in order to compare the proportion of choices to a level expected by chance (*i.e.*, 0.50), we aggregated the data and performed a *signed-rank Wilcoxon test*.

Subsequently, we fitted several *generalized linear mixed-models* (*i.e.*, *GLMM*) to the trial-by-trial dataset, to do so the *glmer* from *lme4* package was used (Bates *et al.*, 2015). Because we used a binary dependent variable in these analyses, we performed Generalized Linear Mixed-

Models (GLMMs) with a *link-logit function* to transform the binary dependent variable into an event probability. (Here the probability of choosing the outcome of interest). In this type of model, *odd-ratios* (i.e., $\exp(\beta)$) were computed. This ratio allows a better interpretation of the models' coefficients. In a nutshell, it determines whether the probability of occurrence of the outcome of interest changes when predictors were incorporated. This ratio is always positive and can be interpreted as follows: (i) *Odd-ratio <1* the probability decrease, (ii) *Odd-ratio = 1*: There is no change in the probability (iii) *Odd-ratio >1*: The probability increase. For qualitative predictor, this ratio is relative to a reference modality (always indicated to the right side in parentheses in this study). For example, considering the experimental conditions in the first model predictor, the reference was *Risk-alone*. Hence, an Odds-ratio greater than 1 indicates that when the risk is associated with novelty, the probability of selecting the risk increases. In contrast, when the odds-ratio is less than 1, it is the probability of choosing the risk increase for the option without novelty. The Odds-ratio for a quantitative predictor will increase with its value. Therefore, if the odds' ratio is less than 1, it represents a decreased probability of choosing the risky option as the value of the predictor increases, and vice versa.

The main goal of our analyses was to investigate the influence of novelty in the risky situation or not on the probability to choose the risk. Hence, experimental conditions as a predictor were implemented as a dichotomous factor (*Risk-Alone* and *Risk-Novelty*). According to the literature review, a moderation effect by the age of the participants was hypothesized, thus the model includes an interaction term between. We used the single term deletion method provided by the *drop1* function in the *stats* package to evaluate the weight of this interaction

term in the model using the Likelihood Ratio Test (LRT). The gender of the participant (*Boy VS Girl*) and the trial number were also added in the model as predictors and the participant ID was added as a random effect. Confidence intervals were calculated Wald method. Thus, the model used to analyse the risk choice had the following structure:

$$Choice \sim Condition * Age + Gender + Trials + (1|ID)$$

A similar model aiming to control the novelty effect on the choice when risk was associate or not was performed. The only difference between the two models is that the Condition factor implies *Safe-novelty* (reference modality) and *Risk-Novelty* instead of *Risk-Along* and *Risk-Novelty*.

3.2.4. Results

3.2.4.1. Choice comparisons to chance level

As shown in Table 2, in the Risk-Only condition, the risky option was chosen 82.7% of the time, broken down by gender: 82.4% of choices were for the risky option for girls and 82.9% for boys. In the *Risk-novelty* the risky / novel option was adopted in 89.3% of cases, 91.9 % choices were directed towards this option for girls and 87.5 % for boys. At last, in the *Safe-novelty* condition 44.7% of choices were in favor of novelty, 44.7% for girls' choices and 44.6 % for boys' choices.

Table 2: Proportions of choices towards risk/novelty by experimental conditions and gender

Condition	Gender	Percentage choice (n)
Risk-alone	Girl	82.4% (56)
	Boy	82.9 % (68)
	Total	82.7% (124)
Risk-novelty	Girl	91.9% (57)
	Boy	87.5% (77)
	Total	89.3% (134)
Safe-novelty	Girl	44.7% (34)
	Boy	44.6% (41)
	Total	44.7% (67)

Note. All trials were aggregate for each condition.

All trial were aggregated by trials and the level of risky or novelty-based decision was compare to the chance level (*i.e.*, 0.5). As shown in figure. 2 the proportion of risky decision was higher than the chance level in the *Risk-Along* (*Wilcoxon signed-rank test*: $W = 1456$, $p < 0.001$, $r = 0.108$) and in the *Risk-Novelty* (*Wilcoxon signed-rank test*: $W = 1770$, $p < .001$, $r = 0.242$), but lower than chance level in the *Safe-Novelty* condition (*Wilcoxon signed-rank test*: $W = 34$, $p = 0.049$, $r = -0.966$).

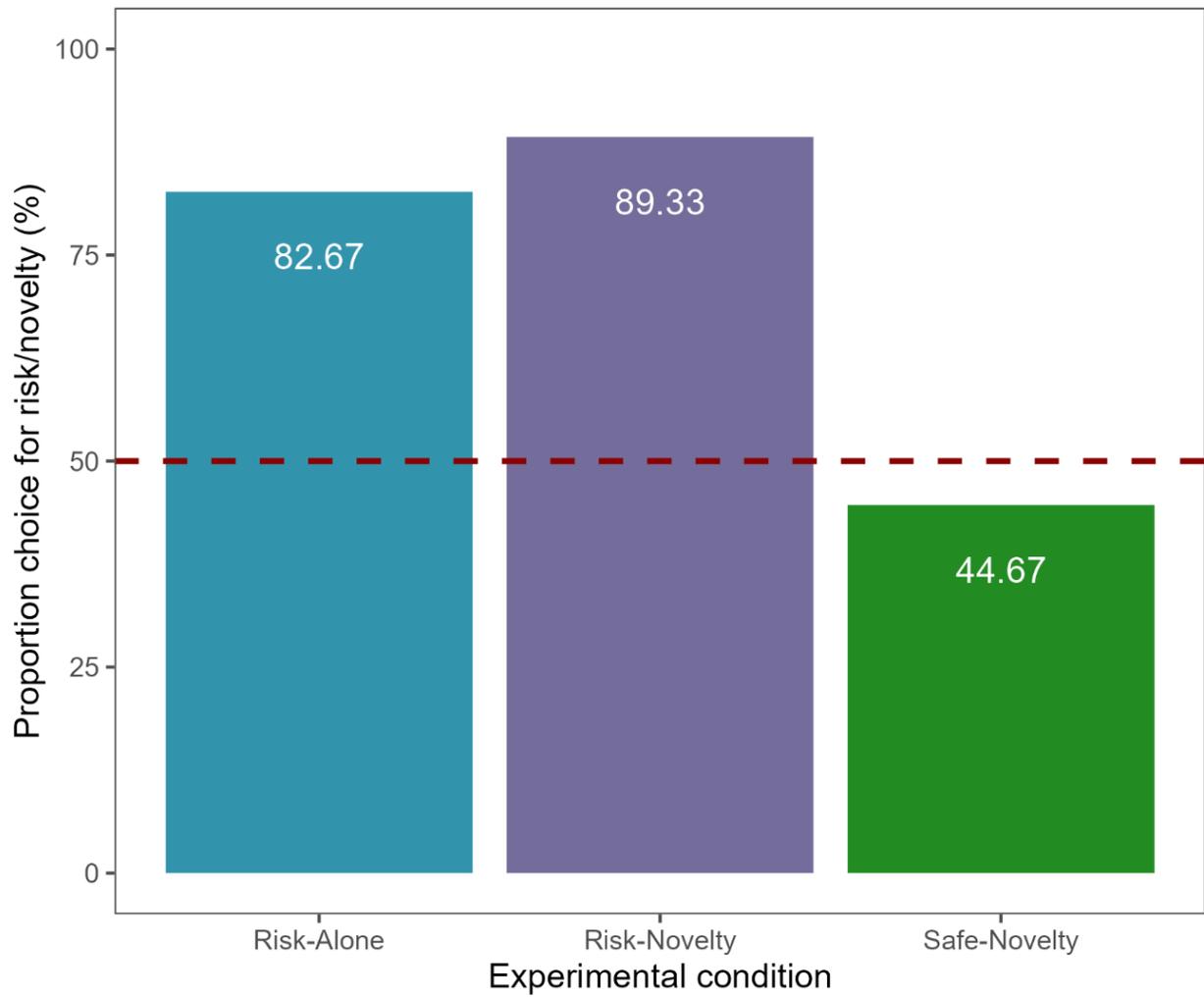


Figure 10 : Proportion choice for the outcome of interest in each experimental condition. In Risk-Alone and Risk-novelty the interest option was the risky one and in Safe-Novelly this option was the novelty option.

Note. The first two histograms represent the choice in favor of risk, and the last one (in green) represents the choice in favor of novelty without risk. The three histograms represent the proportion of choices for the outcome of interest.

3.2.4.2. Risk alone VS novelty analysis

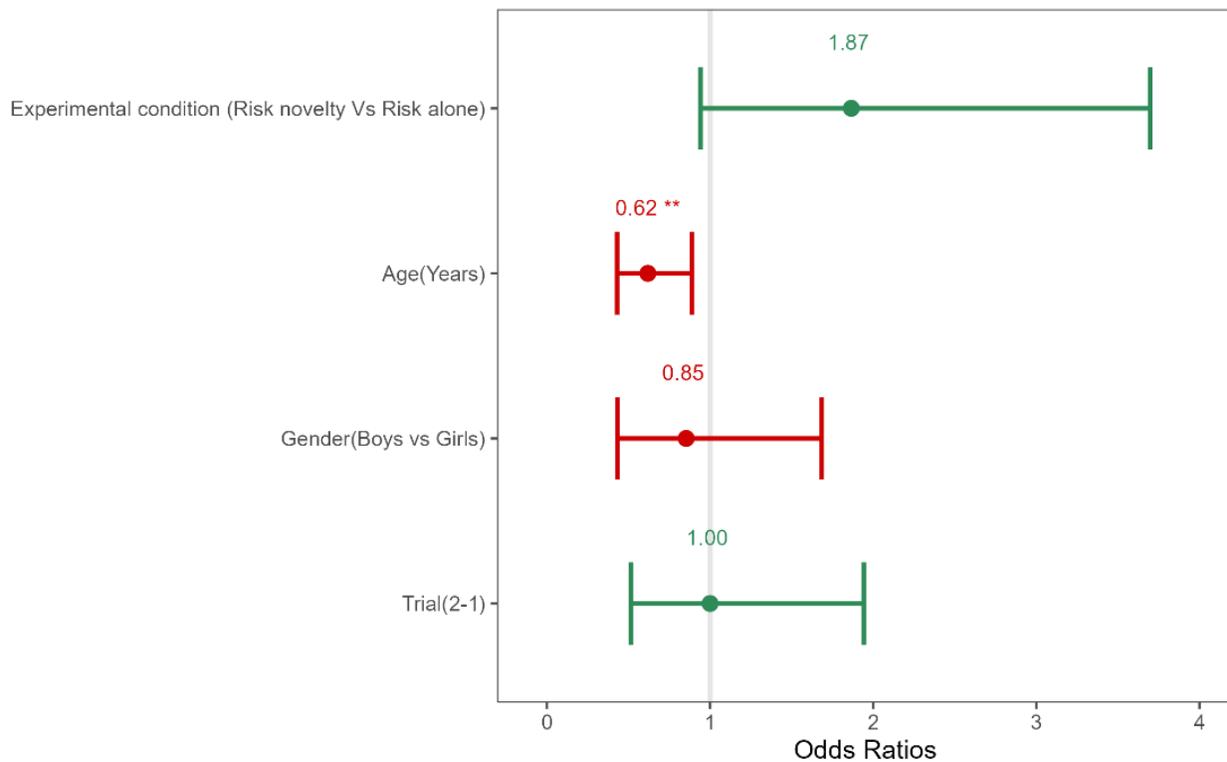


Figure 11 : Glmm forest plot of the fixed effects predicting the risk propensity

Note. The Odd ratio with 95% Ci were reported. There is statistical significance when the 95% CIs do not cross the Odds Ratio of 1.0 (grey vertical line). * $P \leq 0.05$, ** $P \leq 0.01$

Our first model indicates that there is no interaction effect between age and condition ($LRT: X^2_{(2)} = 0.736, p=0.391$). In addition, the data set is slightly better explained by a simpler model without interaction (AIC: 246.22 > 244.96), so a simpler model without interaction was selected for the follow-up analysis. As shown in the Figure. 3, the model suggests a negative age effect ($\beta = -0.481, 95\% CI [-0.845, -0.117], p = 0.009, OR = 0.618$). It seems to indicate that older children are less likely to choose a risky alternative when faced with a safe or risky one.

Otherwise, the model doesn't indicate any effect of experimental conditions ($\beta= 0.624$, 95% CI [-0.061, 1.308], $p= 0.074$, OR = 1.865), of gender ($\beta= -0.159$, 95% CI [-0.838, 0.521], $p = 0.648$, OR = 0.853) nor trials ($\beta= 0$, 95% CI [-0.664, 0.664], $p= 1$, OR= 1).

Table 3 : Coefficients for predicting Risky choice

Predictor	β [95% CI]	Std.Error	Odd ratio [95% CI]	Z	p
<i>Condition (Risk-Novelty Vs Risk-Alone)</i>	0.624 [-0.060, 1.308]	0.349	1.866 [0.941, 3.698]	10.786	0.074
<i>Age</i>	-0.481 [-0.844, - 0.117]	0.186	0.618 [0.430, 0.890]	-2.590	0.009
<i>Gender (Boy Vs Girl)</i>	-0.159 [-0.838, 0.521]	0.347	0.853 [0.433, 1.684]	-0.457	0.648
<i>Trials (2 - 1)</i>	0.000 [-0.664, 0.664]	0.339	1.000 [0.515, 1.942]	0.000	1.000
<i>N_{Observation}</i>	300				
<i>N_{Participant}</i>	150				
<i>AIC</i>	244.959				

Note. In parentheses, the reference modality is always on the left.

3.2.4.3. Novelty risk vs non risk analysis

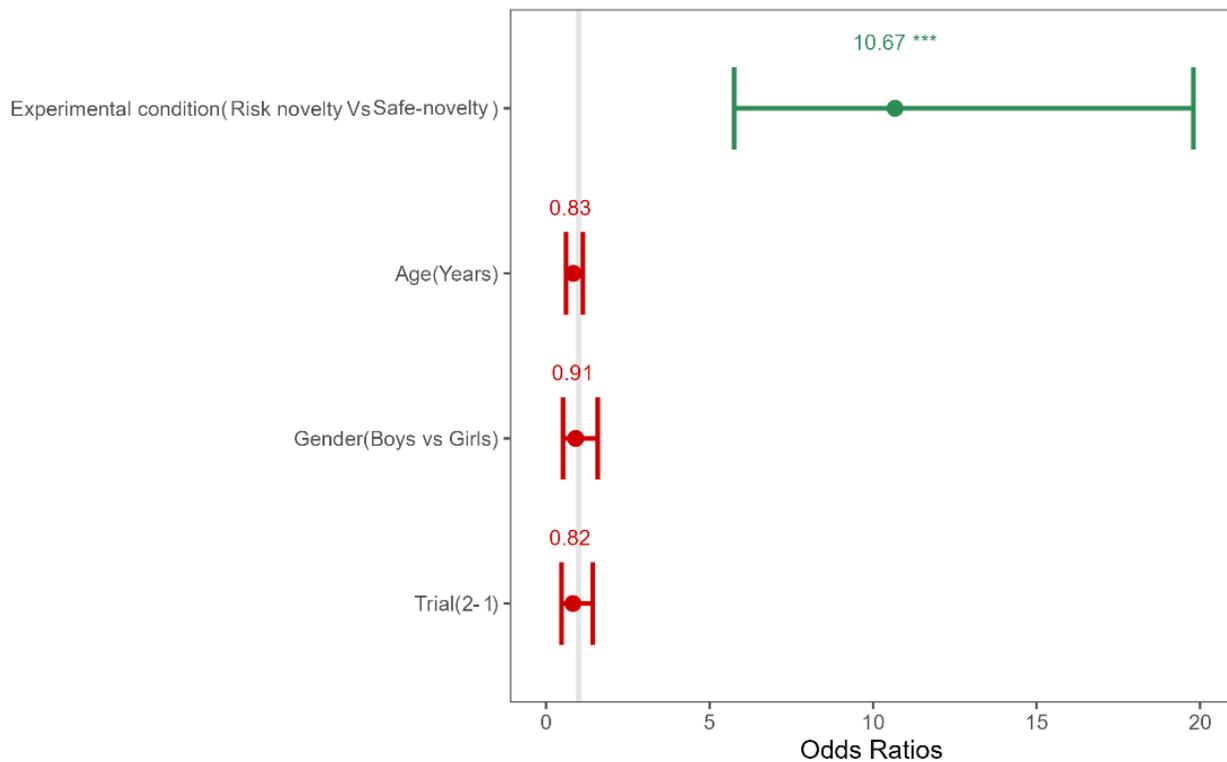


Figure 12 : Glmm forest plot of the fixed effects predicting the choice propensity for novelty when risk is present or not.

Note. The Odd ratio with 95% Ci were reported. There is statistical significance when the 95% CIs do not cross the Odds Ratio of 1.0 (grey vertical line). *** $P \leq 0.001$

The second analysis also failed to indicate an interaction effect between age and experimental conditions ($LRT: X^2_{(2)} = 0.329, p = 0.566$). Thus, the follow-up analysis used a simpler model without interaction, as in the precedent analysis. As shown in **Figure.4** this model suggests an experimental condition effect ($\beta = 2.367, 95\% CI [1.749, 2.986], p < 0.001, OR = 10.670$), The post-Hoc pairwise comparison indicate that children significantly more chose the novelty option where it's associate to risk ($Z = -7.507, p < 0.0001, \sigma = 1$) than where it's just associate to safe choice.

This model doesn't indicate an age effect ($\beta = -0.183$, 95% CI [-0.487, 0.120], $p = 0.236$, OR = 0.832) and neither Gender ($\beta = -0.099$, 95% CI [-0.655, 0.458], $p = 0.729$, OR = 0.906) nor Trials effect ($\beta = -0.196$, 95% CI [-0.746, 0.353], $p = 0.484$, OR = 0.822).

Table 4: Coefficients for predicting Novelty choice

Predictor	β [95% CI]	Std.Error	Odds ratio [95% CI]	Z	p
Condition (Risk-Novelty Vs Safe-Novelty)	2.367 [1.749, 2.986]	0.315	10.670 [5.751, 19.796]	7.508	< 0.001
Age	-0.183 [-0.487, -0.120]	0.155	0.832 [0.615, 1.127]	-1.185	0.236
Gender (Boy Vs Girl)	-0.099 [-0.655, 0.458]	0.284	0.906 [0.519, 1.581]	-0.347	0.729
Trials (2-1)	-0.196 [-0.746, 0.353]	0.280	0.822 [0.474, 1.424]	-0.699	0.484
<i>N</i> Observation	300				
<i>N</i> Participant	150				
AIC	318				

3.2.5. Discussion

Young children choose preferentially risky options in the gain domain, but the underlying mechanisms are poorly understood. This question requires that we understand how novelty-seeking and uncertainty exploration interact in motivating children's economic choices. In order to investigate the mechanisms that underlie risky choice in the gain domain across development, 7- to 9-year-olds were presented with a series of gambling tasks in which participants have to choose between two options with the same expected value, a certain option and a risky option. We observed significant developmental changes in risk sensitivity between the ages of 7 and 9

years. Previous studies reported a decrease in economic risk proneness between the ages of 7 and 13 years (cf. Sutter, 2019, for review). By indicating that children become less prone to uncertainty in gain contexts between 7 and 9 years of age, the present study provides more precision about the developmental trajectory of economic risk preferences.

Our results revealed a decrease in economic risk proneness into middle childhood. As they grow older children are less risk-prone in the gain domain. The question now is as follows: What are the mechanisms implied in the developmental trajectory of risk preferences? A recent study (Roig *et al.*, 2022) suggests that economic risk proneness in young children may reflect an uncertainty-driven exploration. However, in Roig *et al.*'s (2022) study, uncertainty exploration and novelty-seeking were confounded among the mechanisms underlying decision-making under risk of gain. In order to disentangle these components, an unexpected event was associated to the risky option in one task (i.e., the risk-novelty task) and to the safe option in another one (i.e., the safe-novelty task) among the three tasks proposed to participants in the present study. By harnessing with unexpected events safe options in one case and risky options in the other, we decoupled the influence of novelty and uncertainty on economic risk proneness in children. Our results show that 7- to 9-year-olds choose more the novelty option when it is associated to risk than associated to safety. That the preference for the novelty option disappeared when there was no uncertainty associated to it suggests that children's choices were not principally driven by novelty-seeking. Rather, the current evidence that risk induces novelty-seeking suggests that uncertainty-driven exploration plays a key role in children's choices. By showing that reward uncertainty promotes novelty-seeking motivation, the present study suggests an intrinsic

attraction for uncertainty itself. At the light of these findings, the attractiveness of risky option in young children could result from the willingness to reduce uncertainty rather than to uncover something new. Hence, we suggest that economic risk proneness in young children is mediated through intrinsically motivated uncertainty minimization.

Recently, Blanco & Sloutsky (2021) have shown that uncertainty-based exploration dominates behavior in 4-year-olds. These authors suggested that high levels of exploration allow children to understand how the world works. That is why children prioritize gathering information rather than obtaining rewarding outcomes (c.f., Sumner *et al.*, 2019). In our participants, uncertainty seeking behavior may thus be motivated by the willingness to get more information about the environment. Nussenbaum *et al.* (2022) suggested that in childhood the bias toward exploration in detrimental to exploitation may arise from tolerance to uncertainty rather than attraction to novelty. In this view, exploratory actions aim uncertainty reduction. Previous studies (e.g., Schwartenbeck *et al.*, 2019) have shown the informational value of exploratory actions. Moreover, a number of researchers have highlighted the adaptive nature of exploratory behavior in early childhood (e.g., Kidd & Hayden, 2015; Liquin & Gopnik, 2022). They also suggested a developmental shift between exploration strategies that allow young children to learn the features of their environment and exploitation strategies that allow older children to make efficient actions in their environment (e.g., Gopnik *et al.*, 2017). In gain contexts, exploration strategies may allow young children to gather information about potential actions and outcomes and exploitation strategies may allow older children to maximize reward. The

developmental transition between these different strategies in middle childhood may explain why in our study 9-year-olds demonstrated decreased risk proneness compared to 7-year-olds.

The age-related decrease in economic risk proneness we observed in our participants may also reflect an age-related difference in sensitivity to potential losses. Indeed, as 9-year-olds have more accumulated experience than 7-year-olds, we may expect to find a stronger motivation to avoid taking decisions that they would later regret. Thus, anticipated regret could play a more important role in motivating older children's economic choices. By being more motivated to avoid this aversive emotion, 9-year-olds might be less risk-prone than 7-year-olds. From this point of view, the accumulated experience in regret between 7- to 9-year-olds may play a key role in the decline of economic risk proneness in this time period. This hypothesis could be partly tested by investigating how children's attention is distributed in the visual field during the task. More precisely, it would be interesting to know if children who are risk-averse look significantly longer at the potential losses than children who are risk-prone.

To sum up, we observed (i) decreases in risky choices in the gain domain between the ages of 7 and 9 years; and (ii) more choices in 7- to 9-year-olds for the novelty option when it is associated to risk than associated to safety. Our findings are compatible with an interpretation of economic risk proneness in childhood in terms of motivation to explore uncertainty. Indeed, reducing uncertainty appears to be in young children the principal source of motivation to choose uncertain rewards. More precisely, we suggest that (i) in children economic risk proneness is driven more by uncertainty exploration than by novelty-seeking, and (ii) in older children

decreases in risky choices in the gain domain are driven by lesser proneness to reward uncertainty.

3.3. Étude 3

Can economic and physical risk-taking be crossed? Risk proneness across different domains in 7- to 9-year-olds

Anthony Roig¹, Régis Thouvarecq², James Rivière¹

¹Centre for Research on Psychological Functions and Disorders (CRFDP) Scientific Team

(UR 7475), Univ Rouen Normandie, F-76000 Rouen, France

²CETAPS Lab (UR 3832), Univ Rouen Normandie, F-76000 Rouen, France

3.3.1. Abstract

The temporal stability of risk-taking behaviour along with its generalization across different domains and the forces that drive it are current topics of debate. This study investigated economic and physical risk-taking in young children. A total of sixty 7- to 9-year-olds were presented with two computerized risk-taking tasks that tapped different domains, namely economic losses in the Balloon Analogue Risk Task (BART) and physical injury in the Simulated Traffic Task (STT). Our results revealed that the children who displayed the highest risk propensity in the gambling task were more likely to cause a (hypothetical) accident in the simulated street-crossing task. Our findings also showed that the use of novel, unexpected vehicles in the simulated street-crossing task increased physical risk-taking in children. We suggest that an exploratory search strategy linked to novelty-seeking functions as a proximate mechanism that increases both economic and physical risk proneness in children.

3.3.2. Introduction

An individual's attitude toward risk has major consequences for their everyday decision-making. It has an impact on both their physical health and economic wealth. The study of decision-making under risk is therefore a focus of considerable interest in the behavioral sciences, and especially in psychology and economics. The question of the temporal stability of risk preferences is thus under investigation. For instance, a comprehensive psychometric study found that the risk preferences of 1507 adults measured on the basis of 39 risk-taking measures remained very stable over time (Frey *et al.*, 2017). A recent meta-analysis also revealed that the self-reported risk preferences of adult individuals exhibit considerable temporal stability (Mata *et al.*, 2018). It should be noted that the stability observed in adults nevertheless varies considerably across the life-span. Thus, developmental studies have shown age-related differences in economic risk preferences (e.g., Defoe *et al.*, 2015; Levin *et al.*, 2007; Paulsen *et al.*, 2011, 2012). Contrary to what is reported in adults, a high level of risk-proneness in gain contexts is usually observed in children (Harbaugh *et al.*, 2002; Rivière *et al.*, 2018; Van Leijenhorst *et al.*, 2010; Zhu *et al.*, 2016). The shift in risk preferences is not a continuous process during development, but instead occurs before the teenage years. More precisely, a decrease in risk-seeking behavior may occur between the ages of 7 and 10 years (Paulsen *et al.*, 2012; Sutter *et al.*, 2013).

There is, however, a lack of consensus regarding the extent to which risk preferences are generalized across domains. A number of convergent indices indicating that risk-taking is domain-

specific coexist together with a substantial body of evidence suggesting that risk-taking is instead domain-general (cf. Mishra, 2014, for a review). This divergence in the data has led some authors to consider risk preference as a construct that encompasses both general and domain-specific components (Frey *et al.*, 2017). In children, the question of the uniformity of decision-making under risk has still not been sufficiently explored, with the available results also being inconsistent across studies. Hoffrage and collaborators (2003) investigated risk-taking behavior in 5- to 6-year-olds in a gambling game, a simulated traffic situation and a real-traffic situation. Children who were risk-takers in the gambling task had a significantly higher hypothetical accident rate in the everyday-traffic context. In Morrongiello *et al.*'s (2009) study, 7- to 12-year-olds were presented with a balance beam task and an Iowa Gambling Task. The physical risk-taking indexed by the balance beam task (i.e., the height of the beam selected by the child before walking across it) was independent of the economic risk-taking measured in the gambling task. These diverse patterns of results led to different conclusions. Hoffrage *et al.* (2003) suggest that children's risk-taking behavior is correlated across different domains, whereas Morrongiello *et al.* (2009) suggest that it is domain-specific.

The question of the driving force underlying risk-taking behavior is also a topical issue. An emerging line of research highlights the influence of novelty on choice behavior (e.g., Nussenbaum *et al.*, 2022). Thus, a recent study has suggested that economic risk proneness in children reflects an exploratory search strategy (cf. Roig *et al.*, 2022). In Roig *et al.*'s (2022) study, 2.5-year-olds were presented with a gambling task in which they had to choose between two options, a safe option and a risky option characterized by an unexpected event. Toddlers

displayed a strong preference for the risky option, in spite of the high level of novelty associated with it. We suggest that the attractiveness of uncertain reward reflects strong exploratory motivations linked to children's novelty seeking. Indeed, when one possesses only limited information, it may be more advantageous to seek out unknown or novel options (Cohen *et al.*, 2007; Hills *et al.*, 2015; Mehlhorn *et al.*, 2015; Real & Caraco, 1986). Neophilia and curiosity lead children to actively explore their environment (Gopnik, 2020). This enables them to acquire knowledge about the world and, hence, to understand how it works (Blanco & Sloutsky, 2020; Liquin & Gopnik, 2022). A multitude of exploration strategies have been observed in children aged 8 – 9 years (Dubois *et al.*, 2022; Schulz *et al.*, 2019). However, it is difficult to dissociate uncertainty exploration from novelty-seeking during this period of time (cf. Nussenbaum *et al.*, 2022). Therefore, further studies are needed to shed light on the interaction between these components underlying risky choice. Moreover, little is known about the link between novelty-driven exploration and physical risk-taking in childhood.

The present study aims to investigate (i) the link between economic and physical risk-taking in children; and (ii) the effect of novelty on physical risk-taking. Seven- to 9-year-old children completed the following two behavioral measures of risk-taking: The Balloon Analogue Risk Task (BART) and the Simulated Traffic Task (STT). In the BART, participants inflate balloons whose risk of popping is not known in order to obtain the highest reward (Lejuez *et al.*, 2002). BART's ecological validity and its ability to predict real-life risk-taking behavior have been highlighted in previous studies (cf. Rosenbaum *et al.*, 2018, for review). The STT is a simulated road-crossing situation in which participants attempt to reach the other side of the traffic-filled

road safely. The two risk-taking tasks tap different domains, namely economics in the case of BART and physical in that of *STT*. Assuming that common mechanisms underpin risk proneness across different domains, we expected that (i) 7- to 9-year-olds would display stability in their risky decisions across the two tasks, and (ii) that the presence of novelty would increase children's risk-taking in a context of crossing traffic-filled roads.

3.3.3. Matériel et méthode

3.3.3.1. Participant

The participants were 20 7-year-olds ($M = 7.130$ years ± 0.209 ; 10 girls), 20 8-year-olds ($M = 7.938$ years ± 0.278 ; 10 girls), and 20 9-year-olds ($M = 9.185$ years ± 0.384 ; 10 girls). They came from a middle-class socioeconomic background. They lived in an urban environment and were recruited from leisure centers or elementary schools in France. Their parents gave written informed consent prior to the start of the study. The children's consent was obtained by asking them if they wanted to play video games whose rules were explained to them. The protocol was approved by the research ethics committee of the XXX University at XXX (reference number 2021-10-A).

3.3.3.2. Behavioral tasks

Each child completed two computer games during a 10-minute session held on a single day. The order of presentation of the Balloon Analogue Risk Task and the Simulated Traffic Task was counterbalanced between participant.

3.3.3.2.1. Balloon Analogue Risk Task (BART)

Children were presented with a slightly modified version of the BART (https://github.com/AR-search/BART_C.git), which consisted of balloons simulated on a computer screen (Lejuez *et al.*, 2002). They were told that they could inflate the balloon by pumping air into it, with each press on the computer's spacebar adding more air. They were also told that (i) they would earn one point for each successful pump and (ii) that they would receive chocolate chips corresponding to the number of points they had earned at the end of the task. However, if the balloon burst, they would lose all the points they had accumulated for that specific balloon up to that point. After each successful pump, children could choose to cash out the reward (safe option) or to pump again to increase the potential reward (risky option). Each child saw 20 balloons.

3.3.3.2.2. Simulator Sickness Questionnaire (SSQ)

The Simulator Sickness Questionnaire (Kennedy *et al.*, 1993) was administered to participants. Simulator sickness encompasses a variety of symptoms (e.g., nausea, headaches) that can be experienced after exposure to a simulated environment with or without a head-mounted device (Dużmańska *et al.*, 2018). Any child reporting significant perceived symptoms (SSQ score > 10) was excluded from the sample (N = 0).

3.3.3.2.3. Simulated Traffic Task (STT)

The Simulated Traffic Task (STT) is a simulated road-crossing task in which participants attempt to reach the other side of a traffic-filled road in safety (cf. Figures 1A and 1B).

3.3.3.2.3.1. Material

The virtual environment was developed and designed using Unreal Engine (version 4.26.2). This environment included two levels, a lobby area and the test environment. The lobby area consisted of a model of the top floor of a house in which the participant could move around freely. After listening to recorded instructions, the participants had to open a door in order to reach the second level (i.e., the test environment). The test environment was a one-way street (80 meters long and 7.5 meters wide) with a crosswalk at the center (5 meters long and 2.5 m wide) in an urban downtown environment. The vehicle speed was 50 km/hr. Each vehicle started at the same starting point and ended up at the same destination point, both out of the participant's view. When the vehicle reached the destination point, it was instantly transported back to the starting point and started again.

The participant chose the gender of their character. The character's size corresponded to the average size of a child aged 7–9 years (i.e., 1.30 m). The character's speed corresponded to the average crossing speed of a child aged 7–9 years (i.e., 1.10 m/s). All of the models in this environment were 3D volumes in 1:1 scale (1 cm in the STT is equivalent to 1 cm in real-life), to which photo-realistic textures were applied. The atmosphere used was prototypical of a French

street: The buildings reflected the Haussmannian architectural style and the ambient sounds had been recorded in a real French street.

3.3.3.2.3.2. Procedure

Children were seated in front of a 17-inch computer monitor. To introduce the task, they were told "Hello and welcome, you can move through this room using the game pad. When you feel ready, you can move towards the door. You will then stand facing a crosswalk and several cars will pass by. When you feel ready, you can cross the road to the other sidewalk. You may cross as many times as you like on the crosswalk, but you must be careful of the cars."

There were four experimental conditions: (a) a condition with an inter-vehicle gap (IVG) of 3 seconds (called 3-second IVG condition); (b) a condition with an IVG of 7 seconds (called 7-second IVG condition); (c) a novelty condition in which children were presented with a situation that was analogous to that used in the 3-second IVG condition except for the fact that the oncoming vehicles were unexpected and strange cars (cf. Figure 1C); and (d) an empty condition with no vehicle.

Children were asked to cross the street under two temporal conditions (3- and 7-second IVG conditions) to allow us to determine whether their decision-making was modulated by the level of risk. The level of familiarity with the oncoming vehicles was manipulated (usual cars versus unusual vehicles) to examine whether risk-taking was increased by the presence of novelty. The purpose of the empty condition was to check that children had understood that they had to cross the road.

These experimental conditions were presented randomly, except for the empty condition. This latter condition was always the last one presented in order to ensure that participants ended their session on a positive note. When a crossing decision led to a collision, the vehicle became transparent and the traffic continued to flow. Each child completed 20 trials (i.e., 20 IVG) in each condition.

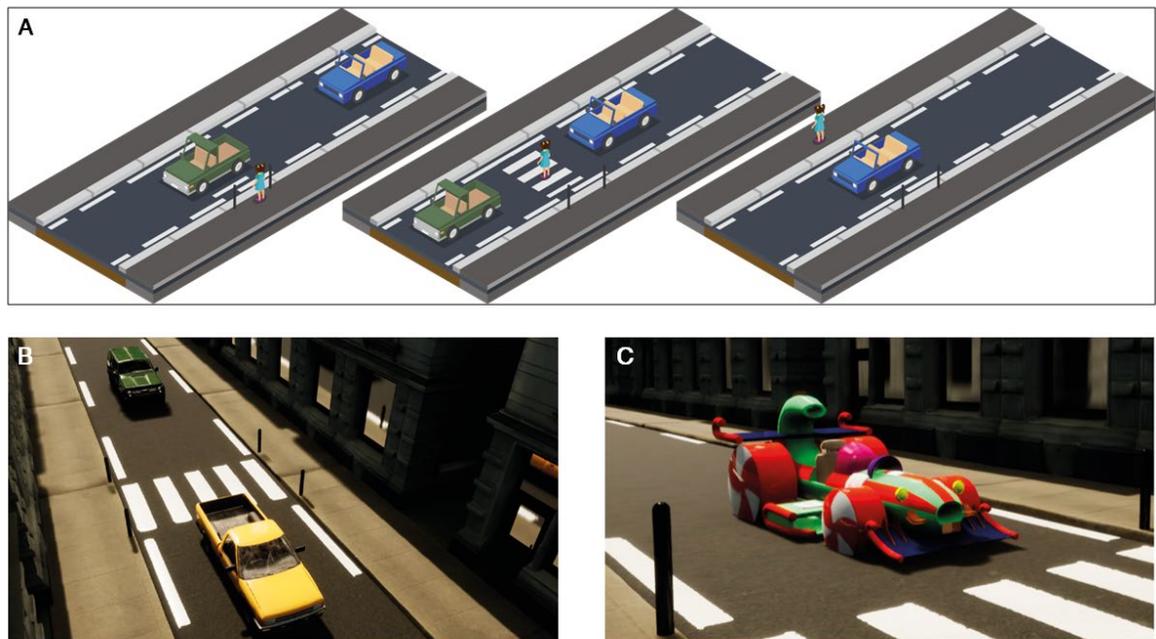


Figure 13 : *The Simulated Traffic Task. (A) Participants attempted to reach the other side of the traffic-filled road in safety. Unsuccessful risk-taking resulted in a collision. Subjects completed 60 trials (20 in each experimental condition). (B) and (C) The distance between the vehicles as well as the familiarity of the vehicles were manipulated*

3.3.4. Datas analysis

3.3.4.1. BART behavior

Due to some violations of assumptions (homoscedasticity and normality), data were analyzed with a non-parametric test using R software (R version 4.2.0). In the original BART (Lejuez *et al.*, 2002), the measure of risk behavior was the adjusted average number of pumps (i.e., the average number of pumps on unexploded balloons). Both the adjusted average number of pumps and the cash-out rate were used to measure risk behavior on the BART in our study. To evaluate the effect of age, we used a non-parametric one-way ANOVA alternative, the Kruskal-Wallis test. Post-hoc pairwise comparisons were performed using the Wilcoxon rank sum test with a Holm correction for multiple testing.

3.3.4.2. STT behavior

A ratio was calculated by dividing the number of crossings by the number of IVG for each condition. Since some children crossed twice in the same IVG condition, this ratio could exceed 1. Due to the fact that our data do not follow normal distribution, the effect of age and experimental condition on this crossing ratio was analyzed using a mixed-design permutation ANOVA implemented with the `aovperm` function from the `permuco` package (Frossard & Renaud, 2021). We chose to set a high number of permutations (100,000 permutations). In addition, the effect size, i.e. the partial eta-squared, was calculated manually. Post-hoc pairwise multiple

comparisons were performed. Since multiple comparison could lead to family-wise error rate, all comparisons were adjusted using a Holm correction to control type 1 errors (i.e., false positive).

Two-way ANOVAs were conducted to examine the child-vehicle distance at the time of crossing and the number of collisions across age groups in each condition. A mixed-design ANOVA test was used because each child completed each condition. Post-hoc pairwise comparisons were conducted on each significant factor in the event of non-significant interactions. In the case of significant interactions, reduction analyses (i.e., one-way ANOVA test) were conducted on the simple main effects. Pairwise multiple comparisons with Holm correction were then performed.

3.3.4.3. Correlation between economic and physical risk-taking

The Spearman correlation was calculated between the two BART scores as well as between the *BART* scores and the behavioral measurements on the *STT*.

3.3.5. Résultats

3.3.5.1. BART performance

As shown in Figure 2A, the Kruskal-Wallis test revealed a significant effect of age on the adjusted average number of pumps, $X^2_{(2, N=60)} = 8.97, p = .011, \eta^2 = 0.122$. Pairwise comparisons using the Wilcoxon rank sum test showed that 9-year-olds were significantly more risk-averse than 8- and 7-year-olds (9<8: $W = 298, p_{holm} = .022$; 9<7: $W = 291.5, p_{holm} = .028$). The difference in risk-taking between 7- and 8-year-olds was not significant ($W = 182, p_{holm} = .640$). As shown in Figure 2B, the Kruskal-Wallis test also revealed a significant effect of age on the cash-out rate, X^2

(2, N=60) = 9.48, $p = .009$, $\eta^2 = 0.131$. Pairwise comparisons using the Wilcoxon rank sum test showed that 9-year-olds had a significantly greater cash-out rate than 8- and 7-year-olds (9>8: $W = 108$, $p_{holm} = .023$; 9>7: $W = 98.5$, $p_{holm} = .016$). The difference in cash-out rate between 7- and 8-year-olds was not significant ($W = 191.5$, $p_{holm} = .826$).

The Spearman correlation indicated a significant negative association between pumps and cash-out rates ($r_s = -.866$, $p < .001$). The more pumps the children applied to their balloons, the less they decided to cash-out.

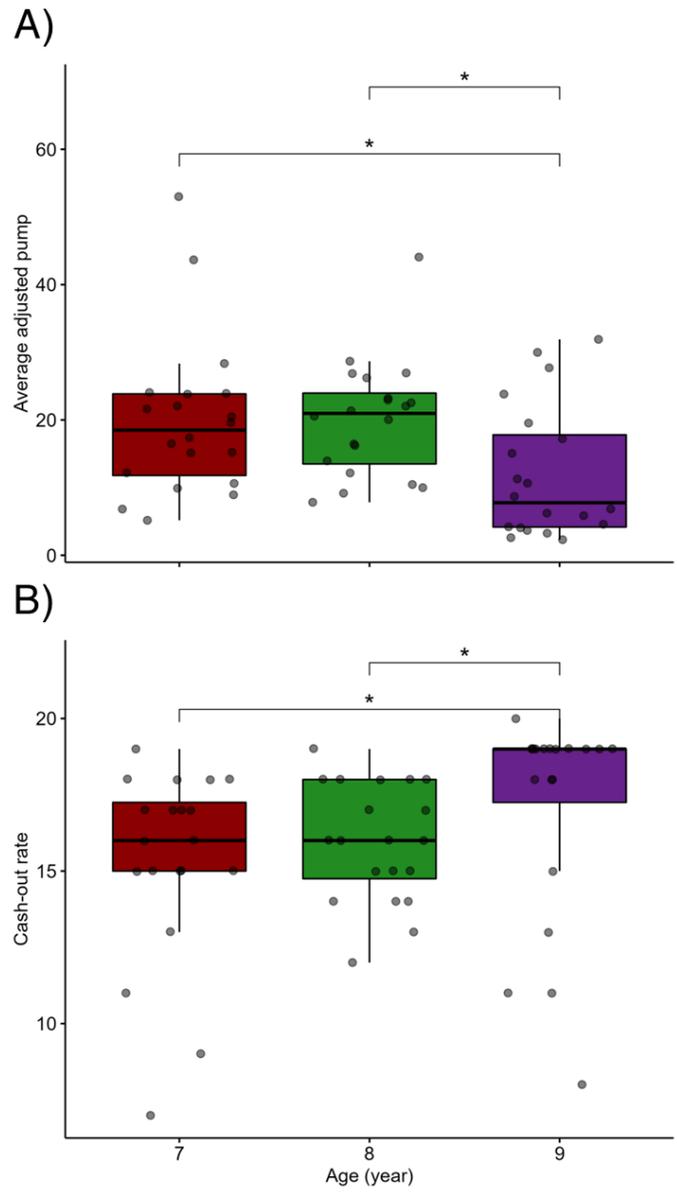


Figure 14 : Boxplot depicting the children's performances by age in the Balloon Analogue Risk Task. A) Adjusted average pumps, B) Cash-out rate. **Note.** Each dot represents one subject. * $p \leq .05$

3.3.5.2. Simulated Traffic Task (STT) performance

3.3.5.2.1. Crossing ratio

The crossing ratio was 0.305 ± 0.093 in the 3-second IVG condition, 0.814 ± 0.164 in the 7-second IVG condition and 0.366 ± 0.084 in the novelty condition. The Wilcoxon signed-rank test indicated that children crossed more than an indifference point (i.e., 0.5) in the 7-second IVG condition ($W = 1763$, $p_{holm} < .001$), and less in both the 3-second IVG and novelty conditions (respectively, $W = 3$, $p_{holm} < .001$, and, $W = 23$, $p_{holm} < .001$).

As shown in Figure 3, the 3×3 permutation ANOVA revealed a significant effect of condition on the crossing ratio, $F_{(2,114)} = 579.57$, $p < .001$, $\eta^2 = 0.91$. Post-hoc pairwise comparisons showed that participants in the 3-second IVG condition crossed significantly less than in either the novelty or the 7-second IVG conditions (respectively, $Pseudo-t = -3.57$, $p_{holm} < .001$; $Pseudo-t = -9.68$, $p_{holm} < .001$). Post-hoc pairwise comparisons also showed that participants in the novelty condition crossed significantly less than participants in the 7-second IVG condition ($Pseudo-t = 9.45$, $p_{holm} < .001$). There was no effect of age on the crossing ratio, $F_{(2,57)} = 1.64$, $p = .199$. Furthermore, there was no interaction effect between age and condition, $F_{(4,114)} = 2.08$, $p = .087$.

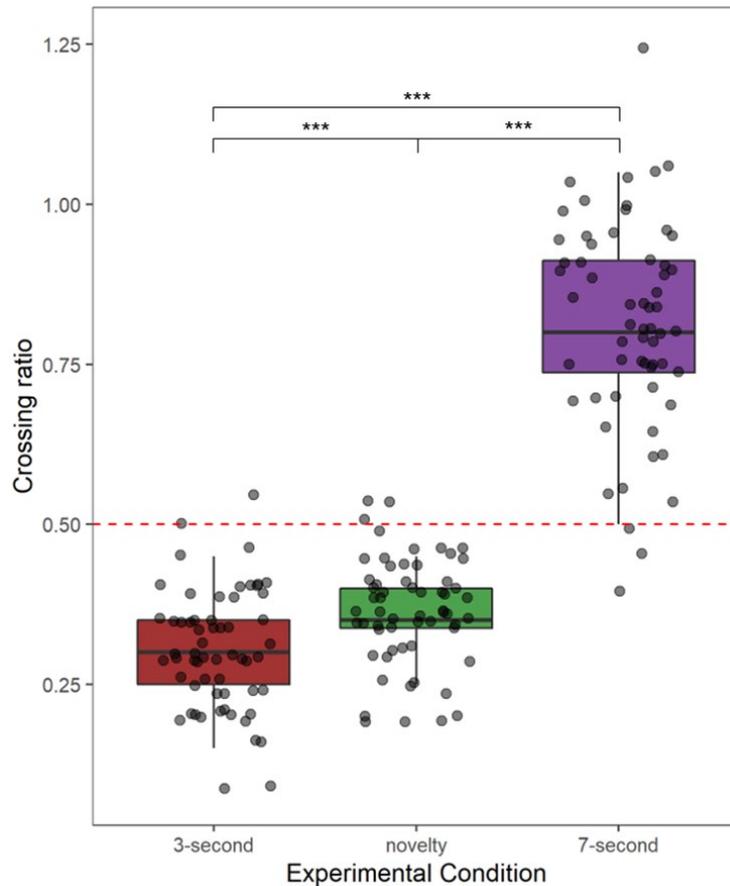


Figure 15: Boxplot depicting the crossing ratio across experimental conditions in the Simulated Traffic Task. Note. Each dot represents one subject. **Note.** The dashed line depicts the indifference level. *** $p \leq .001$

3.3.5.2.2. Child-vehicle distance at the time of crossing

Results of a mixed-design ANOVA showed both a significant interaction effect between age and condition (the effect size for the interaction was small), $F_{(4,114)} = 2.589$, $p = .040$, $\eta^2 = 0.034$, and a significant effect of age on the child-vehicle distance at the time of crossing, $F_{(2,57)} = 5.443$, $p = .007$, $\eta^2 = 0.105$. There was no effect of condition on the child-vehicle distance at the time of crossing, $F_{(2,114)} = 0.604$, $p = .548$, $\eta^2 = 0.004$.

We analyzed the simple main effect of age within each condition. There was no significant difference between age groups in the *7-second* IVG condition, $F_{(2,57)} = 0.436$, $p_{holm} = .648$, $\eta^2 = 0.015$. The analysis revealed significant differences between age groups in both the *3-second* IVG condition, $F_{(2,57)} = 7.596$, $p_{holm} = .003$, $\eta^2 = 0.210$, and the *novelty* condition, $F_{(2,57)} = 5.133$, $p_{holm} = .018$, $\eta^2 = 0.153$. Post-hoc pairwise multiple comparisons were performed (see Figure 4). In the *3-second* IVG condition, results revealed a significant difference between 7-year-olds and both 8- and 9-year-olds (7- vs 8-year-olds: $t = 3.376$, $p_{holm} = .005$; 7- vs 9-year-olds: $t = 3.264$, $p_{holm} = .005$), but not between the 8- and 9-year-olds ($t = 0.450$, $p = .656$). In the *novelty* condition, the analysis only indicated a significant difference between 7- and 9-year-olds (7- vs 9-year-olds: $t = 3.468$, $p_{holm} = .004$). In the *7-second* IVG condition, there was no significant difference between age groups ($p_{holm} = 1$ for all comparisons). In short, in the riskiest conditions (*i.e.*, with an IVG of 3 seconds) with or without novelty, the youngest children were the last to initiate their crossings.

We also analyzed the simple main effect of condition within each age group. There was no significant difference between conditions in either the 8- or the 9-year-olds (respectively, $F_{(2,38)} = 0.938$, $p_{holm} = .400$, $\eta^2 = 0.017$, and $F_{(2,38)} = 0.812$, $p_{holm} = .416$, $\eta^2 = 0.017$). The analysis revealed a significant difference between conditions in 7-year-olds, $F_{(2,38)} = 4.039$, $p_{holm} = .026$, $\eta^2 = 0.073$. In 7-year-olds, pairwise comparisons only showed a significant difference between the *3-second* and *7-second* IVG conditions ($t = 3.257$, $p_{holm} = .012$). There was no significant difference between the other conditions (*3-second* vs *novelty*: $t = 1.571$, $p_{holm} = .226$; *7-second* vs *novelty*: $t = -0.992$, $p_{holm} = .333$).

Overall, these results indicate that the effect of age on the child-vehicle distance at the time of crossing depends on the experimental conditions. Indeed, with age, the distance between the child and the vehicle decreased significantly in the highest risk conditions (*i.e.*, both 3-second IVG condition and *novelty* condition) compared to the lowest risk condition (*i.e.*, 7-second IVG condition). These findings also reveal that crossing is only delayed in the youngest children tested in the riskiest conditions (*i.e.*, with an IVG of 3 seconds) with or without novelty.

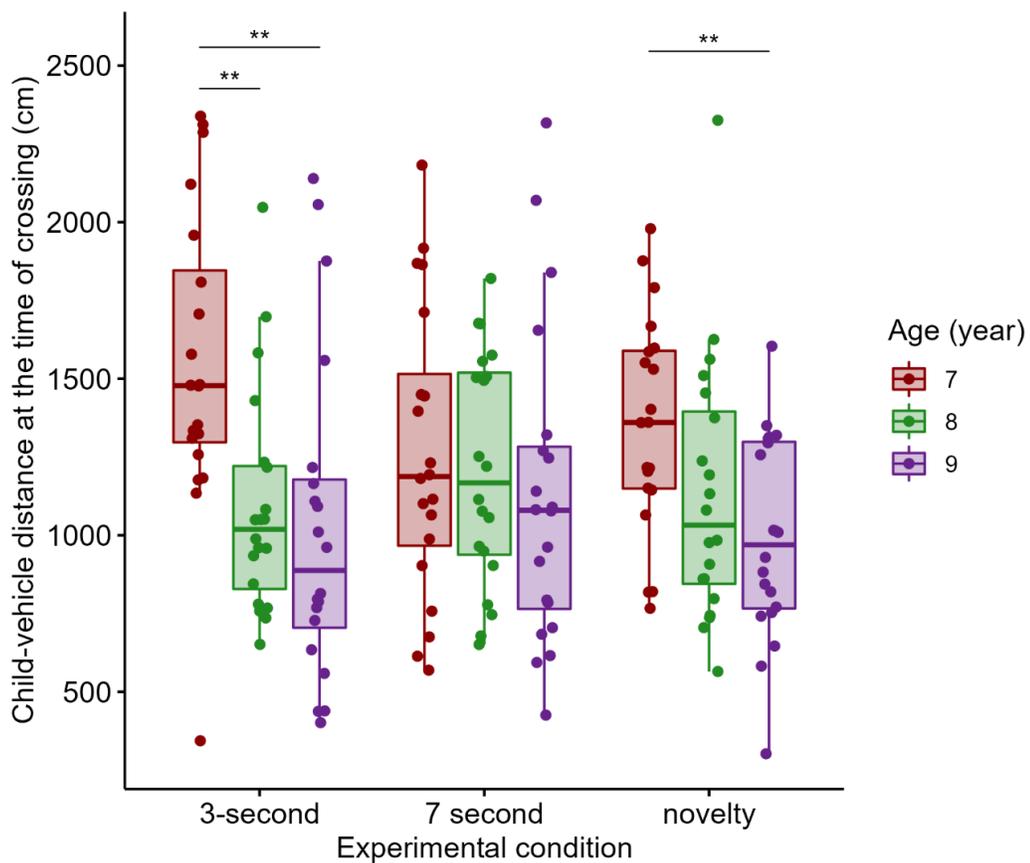


Figure 16 : Boxplots depicting the child-vehicle distance at the time of crossing across both age groups and experimental conditions in the Simulated Traffic Task. **Note.** Each dot represents one subject. ** $p \leq .01$

3.3.5.2.3. Numbers of collisions

As shown in Figure 5, the results of a two-way mixed-design ANOVA showed a significant interaction effect between age and condition, $F_{(4,114)} = 2.96$, $p = .023$, $\eta^2 = 0.049$, a significant effect of age on the number of collisions, $F_{(2,57)} = 6.96$, $p = .004$, $\eta^2 = 0.10$, and a significant effect of condition on the number of collisions, $F_{(2,114)} = 134.72$, $p < .001$, $\eta^2 = 0.538$.

We analysed the simple main effect of age within each condition. A significant effect of age on the number of collisions was observed in the *3-second* IVG condition, $F_{(2,57)} = 8.92$, $p_{holm} = .001$, $\eta^2 = 0.238$. There was no effect of age on the number of collisions in either the *7-second* IVG condition, $F_{(2,57)} = 1.22$, $p_{holm} = .303$, $\eta^2 = 0.041$, or the *novelty* condition, $F_{(2,57)} = 2.04$, $p_{holm} = .280$, $\eta^2 = 0.067$. In the *3-second* IVG condition, a pairwise post-hoc analysis indicated a significant difference between 7- and 8-year-olds ($t = 2.967$, $p_{holm} = .011$), and between 7- and 9-year-olds ($t = 4.270$, $p_{holm} < .001$). There was no significant difference between 8- and 9-year-olds ($t = 1.193$, $p_{holm} = 0.240$). These results indicate that it was primarily the youngest children (*i.e.*, 7-year-olds) who were hit by more cars in the *3-second* IVG condition.

We also analysed the simple main effect of condition within each age group. A significant effect of condition on the number of collisions was observed in all age groups (7-year-olds: $F_{(2,38)} = 68.14$, $p_{holm} < .001$, $\eta^2 = 0.685$; 8-year-olds: $F_{(2,38)} = 37.69$, $p_{holm} < .001$, $\eta^2 = 0.457$; 9-year-olds: $F_{(2,38)} = 33.33$, $p_{holm} < .001$, $\eta^2 = 0.455$). In 7-year-olds, post-hoc pairwise comparisons showed a significant difference between the *3-second* IVG condition and the *7-second* IVG condition ($t = 12.60$, $p_{holm} < .001$) and between the *7-second* IVG condition and the *novelty* condition ($t = -9.49$,

$p_{\text{holm}} < .001$). No significant difference was found between the *3-second* IVG condition and the *novelty* condition ($t = 0.32$, $p_{\text{holm}} = .75$). In 8-year-olds, the post-hoc analysis showed a significant difference between the *3-second* IVG condition and the *7-second* IVG condition ($t = 8.14$, $p_{\text{holm}} < .001$) and between the *7-second* IVG condition and the *novelty* condition ($t = -6.62$, $p_{\text{holm}} < .001$). We found no significant difference between the *3-second* IVG condition and the *novelty* condition ($t = 1.20$, $p_{\text{holm}} = .24$). In 9-year-olds, post-hoc pairwise comparisons revealed a significant difference between the *3-second* IVG condition and the *7-second* IVG condition ($t = 6.20$, $p_{\text{holm}} < .001$) and between the *7-second* IVG condition and the *novelty* condition ($t = -7.13$, $p_{\text{holm}} < .001$). No significant difference was found between the *3-second* IVG condition and the *novelty* condition ($t = -1.88$, $p_{\text{holm}} = .074$).

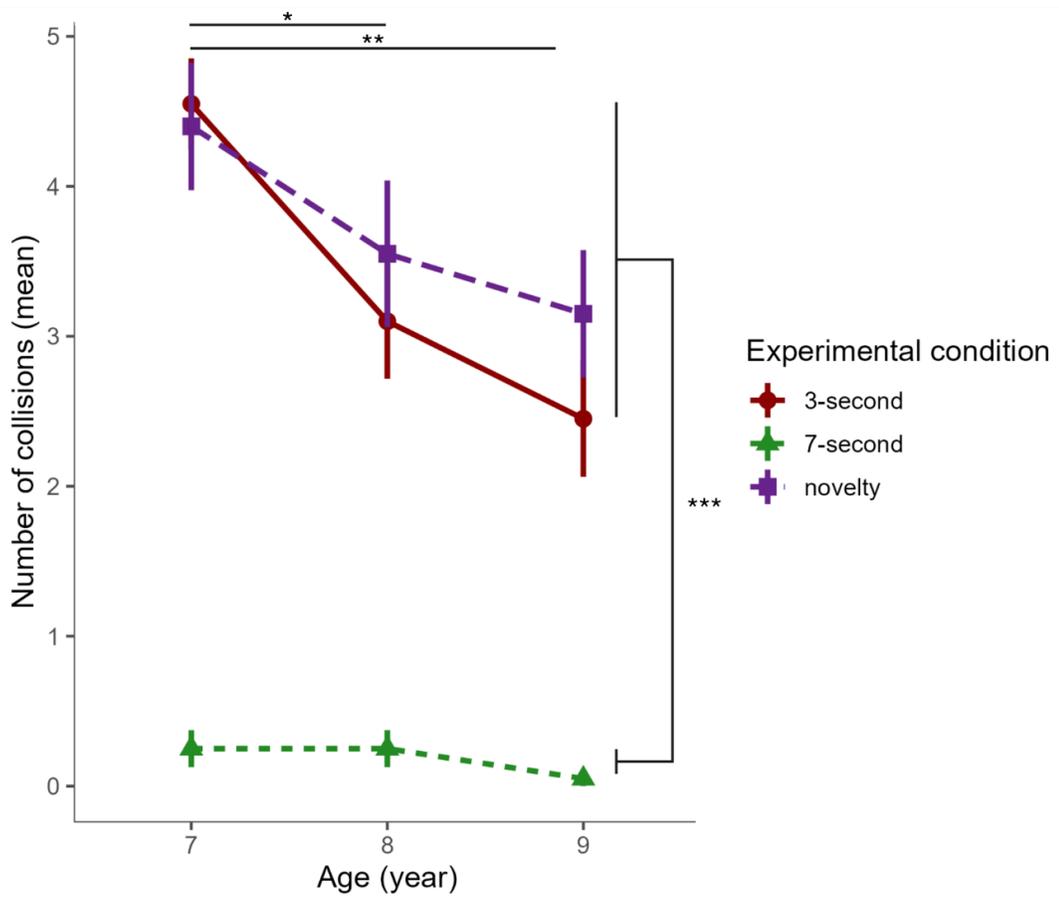


Figure 17: Interaction plot depicting the number of collisions (mean) across both age groups and experimental conditions in the Simulated Traffic Task. Note. * $p \leq .05$, ** $p \leq .01$, *** $p \leq .001$

3.3.5.3. Consistency of risky decisions across tasks

A correlation analysis was conducted to determine whether economic risk-taking (*i.e.*, adjusted average pumps) in the *Balloon Analogue Risk Task (BART)* was positively related to physical risk-propensity in the *Simulated Traffic Task (STT)*. Due to the strong relationship between pumps and cash-out rates, adjusted average pumps were selected as an economic risk-taking measure for the *BART*. As shown in Table 1, adjusted average pumps positively correlated

with the number of collisions ($r_s = 0.27, p = .016$), the number of crossings ($r_s = 0.29, p = .011$) and the child-vehicle distance at the time of crossing ($r_s = 0.23, p = .03$) reported in the 3-second IVG condition in the *STT*. Adjusted average pumps positively correlated with both the number of collisions ($r_s = 0.33, p = .004$) and the child-vehicle distance ($r_s = 0.30, p = .010$) reported in the novelty condition in the *STT*. Adjusted average pumps positively correlated with the child-vehicle distance reported in the 7-second IVG condition in the *STT* ($r_s = 0.24, p = .030$).

Table 1 : Spearman correlations between adjusted average pumps in the BART and measures in the STT.

STT MEASURES	3-second IVG	Novelty	7-second IVG
Number of crossings	.295 *	.112	.123
Child-vehicle distance	.231*	.300 *	.243 *
Number of collisions	.277 *	.338 *	.081

Note. Each line reports the rho coefficient * $p < .05$ (one-tailed)

3.3.6. Discussion

The goal of the present study was to examine (i) the extent to which children’s risk attitudes are consistent across different domains, and (ii) the link between physical risk-taking and the presence of novelty in a context of crossing traffic-filled roads. Children aged 7 to 9 years were presented with two computerized risk-taking tasks, namely an economic game, the Balloon Analogue Risk Task (BART) and the Simulated Traffic Task (STT). In the economic task, our findings indicate that 9-year-olds were significantly less risk-prone than 8- and 7-year-olds. These results fit well with previous studies indicating that risk-seeking behavior decreases between the ages

of 7 and 10 years in gain contexts (e.g., Harbaugh *et al.*, 2002; Levin *et al.*, 2007; Paulsen *et al.*, 2012; Sutter *et al.*, 2019).

Our study provides some elements of a response to the question “Who takes risk, and when?”. Risk proneness on the BART positively correlated with risk-taking behavior in the STT. Indeed, children who showed the highest risk propensity on the BART crossed the street and were hit by cars significantly more than the others in the highest risk condition (i.e., 3-second IVG condition). They also took longer to initiate their crossing. In other words, the more risk-prone children were in gain contexts in the BART, the more likely they were to be hit by a car as pedestrians in the STT. The fact that the children who were more risk-prone on the BART made more harmful crossing decisions in the highest risk condition of the STT is consistent with previous studies demonstrating that risk preference in children is correlated with risk level. Thus, Paulsen and collaborators (2011) observed age-related differences in economic risk preferences only in situations characterized by a heightened risk level (i.e., greater variability in outcomes compared to alternatives). In contrast to adolescents and young adults, children showed an increasing preference for the risky option as risk level increased.

Our results also fit well with the seminal work of Hoffrage and collaborators (2003), who suggested that risk-taking behavior in 5- to 6-year-olds is correlated across different domains, in this case an economic game and a real-traffic situation. Hoffrage *et al.* (2003) proposed that the payoff structure of the economic task should mimic the higher costs of wrong decisions in traffic by resulting in non-compensatory and large losses. Indeed, they argued that only tasks with

comparable payoff structures are able to provide an accurate approximation to pedestrian crossing behavior.

However, our findings differ from those obtained by Morrongiello and collaborators (2009, 2012) demonstrating a domain-specificity in children's risk-taking. In Morrongiello *et al.*'s (2009) study, the performances of children aged 7 – 12 years on a balance beam task and the Iowa Gambling Task were independent of one another. It should be noted, however, that participants in the Iowa Gambling Task can compensate for a loss by choosing another card (Bechara *et al.*, 1994). The payoff structure is different in physical risk situations in which bad outcomes are not compensable. In Morrongiello *et al.*'s (2012) study, the scores of children aged 7 – 12 years on the BART and on a physical risk-taking task were independent of one another. To assess the intentions of the participants to take physical risks, they were first shown videos presenting children in physically risky situations and then asked to indicate their personal judgments of each behavior of the child in the video. They had to answer the following question: "Will you do this in your video?". This experimental design led children to make decisions based on their judgment of a description, whereas the BART requires decisions based on experience. This difference in methodologies is important in the light of the phenomenon referred to as the description-experience gap in risky choices, which shows that whereas individuals are risk-averse when asked to make description-based choices, they are more risk-prone in experience-based choices (Hertwig & Erev, 2009; Ludvig *et al.*, 2014; Rosenbaum *et al.*, 2018). Recent studies have reported developmental differences in description-based versus experience-based decision-making under risk. Thus, in their study of children aged 5 – 9 years, Rolison *et al.* (2022) observed

that the willingness to take a risk in a description-based task increased with age, whereas it decreased in an experience-based task. The decline in risk-taking we observed in the BART between the ages of 7 and 9 years is consistent with Rolison *et al.*'s (2022) observations.

In the present study, the stability of risky choices across situations we observed in 7- to 9-year-olds could have been favored by both the similarity between the payoff structures in our two tasks, which associated high costs with risky decisions, and the similar task formats, which mobilized the participant's personal experience. Thus, risk-taking in our situations could result in immediate, substantial and non-compensable losses, namely all the points accumulated in the BART and severe physical injury in the STT. In sum, in our tasks, we observed both a decline in risk-taking with age and a cross-domain correlation. We therefore argue both that children become more cautious and less likely to take risks at around 8 years of age and that those who take economic risks are more likely to be physically injured.

We also found an effect of stimulus novelty on children's risky choices. In our simulated street-crossing task, vehicle-related novelty increased physical risk-taking in children. Indeed, in the 3-second IVG condition, children of all ages crossed the road significantly more often in the presence of unexpected vehicles than when only familiar cars were present. Furthermore, in the riskiest conditions (i.e., with an IVG of 3 seconds) with or without novelty, the youngest children (i.e., 7-year-olds) left a greater distance between themselves and the passing vehicle, resulting in a delay in initiating the crossing and thus increasing the possibility of a negative outcome (i.e., being hit by a car). These results should be seen in the light of recent works suggesting that, in early life, novelty-seeking could be linked to both reward uncertainty (Nussenbaum *et al.*, 2022)

and risk-seeking (Roig *et al.*, 2022). This raises the possibility that high risk-proneness in early life may reflect an intense search strategy (Rolison *et al.*, 2022). Recent studies have suggested that curiosity-driven exploration plays a key role in children's learning and development (e.g., Kidd & Hayden, 2015; Liquin & Gopnik, 2022). It may also emerge as a risk-seeking tendency in novel, risky environments (Rolison *et al.*, 2022). Thus, a recent comparative study found a link between economic risk-proneness and levels of neophilia (Roig *et al.*, 2022). In contrast to Capuchin monkeys, which display a cautious attitude toward new situations, children aged 2.5 years were found to be risk-prone in a choice environment characterized by a high level of novelty.

In the present study, we argue that the increase in physical risk-taking in the presence of unexpected vehicles is due to an exploratory behavior linked to novelty-seeking. We believe that the increased number of crossings observed in the novelty condition reflects an exploratory strategy manifested as the exploration of novel environments (i.e., curiosity-driven). In line with this account, we speculate that correlations across the different domains observed in our study of children's risk-taking behavior reflect the involvement of common mechanisms. More precisely, a heightened inclination to take risks in different domains may indicate that children rely more heavily on an exploratory strategy to guide their decision-making. In other words, risky decision-making may be an exploration-driven behavior.

Several limitations must be kept in mind in considering the findings from this study. First, the mean speed of movement was fixed. This may confound what is due to traffic versus the unnatural experience of crossing at a rate that is not what one has experience using. Across the age groups it could be possible that the rate may have felt more natural for some ages than

others, so there would be differential effects of the fixed crossing rate on performance data. Relatedly, Morrongiello and her colleagues (2016) have shown that children use evasive actions (e.g., changes in walking speed when crossing streets) to moderate risk of being hit. This would not have been an option in the present study and may have affected children's crossing behaviors. Secondly, the size of the current sample was relatively small. Replication of the current findings is thus recommended.

3.3.7. Conclusion

By demonstrating that children aged 7 – 9 years who take economic risks are also likely to take physical risks, the present study suggests that common mechanisms underpin risk proneness across different domains. Furthermore, by showing that the presence of novelty increases physical risk-taking in children, our findings also suggest that risky decisions are the result of a novelty-driven exploration. Overall, they raise the possibility that an exploratory search strategy guides decision-making in both economic and physical risk-taking. Exploratory behavior plays a key role during the earlier stages of development. Extracting information from the environment through exploration allows children to gain a massive amount of knowledge (Blanco & Sloutsky, 2020; Gopnik, 2020). Recent studies (Dubois *et al.*, 2022; Schulz *et al.*, 2019) have demonstrated that children aged 8 – 9 years deploy a multitude of exploration strategies that can be considered as powerful learning opportunities. However, exploratory behavior can lead children of this age to make risky decisions in different domains. By increasing the reward value of risky choices, a novelty-driven exploratory strategy can thus favor both economic risk

prone to physical risk-taking. Novelty exploration can lead to suboptimal decision-making with consequences that can be harmful for both the physical health and economic wealth of individuals.

Partie 4 : Discussion générale

4.1. Rappel des résultats de la thèse

La présente thèse explore la décision sous risque en intégrant une approche pluridisciplinaire qui mêle la psychologie du développement de l'enfant, l'économie comportementale et la cognition comparée avec les primates non-humains. L'objectif central est d'identifier les facteurs qui influencent l'appétence au risque et de comprendre leur développement. À cette fin, nous développons des paradigmes à la fois rigoureux dans leur conception et simples dans leur mise en œuvre. Les résultats obtenus apportent des éclairages sur la trajectoire développementale de la décision sous risque et sur les facteurs qui peuvent influencer l'appétence pour le risque.

Utilisant le jeu économique comme méthode de test, nous proposons une tâche accessible et adaptable à des populations très différentes, dont certaines ne possèdent pas de compétences verbales. Contournant les biais potentiellement introduits par une consigne verbale, cette approche permet d'obtenir des données plus fiables sur les comportements des sujets et les facteurs qui les influencent (Brosnan & Wilson, 2023; De Petrillo & Rosati, 2021). L'une de nos études (*i.e.*, étude 3) examine les liens entre la prise de risque manifestée dans des

domaines différents, en l'occurrence, ceux économiques et physique. Nous utilisons un jeu économique intitulé BART (Lejuez *et al.*, 2002) dans lequel une perte non compensable est impliquée. Nous développons également une simulation de traversée pédestre en réalité virtuelle dans laquelle les participants doivent traverser une route caractérisée par un flux de voitures élevé ou faible. Cette approche nous permet d'explorer les similarités et les différences dans la prise de risque entre deux situations distinctes.

L'un des objectifs de cette thèse est d'explorer l'effet de l'âge sur la décision sous risque. À cette fin, les études 2 et 3 testent des enfants âgés entre 7 et 9 ans, période durant laquelle un changement dans l'attitude face au risque est supposé (Paulsen, Platt, *et al.*, 2012). Les résultats de ces deux études suggèrent que, sur le plan de la décision économique, les enfants âgés entre 7 et 9 ans se détournent progressivement des options risquées pour privilégier les options sécurisées. Sur le plan physique, l'association entre l'âge et le comportement de traversée de route présente une certaine complexité. En effet, les résultats ne permettent pas, d'établir de manière claire et définitive la relation entre l'âge et tous les aspects du comportement de traversée. Cependant, nos observations indiquent que, même si tous les enfants adoptent un comportement relativement prudent, les plus jeunes ont tendance à initier leur traversée de manière plus tardive. En conséquence, ils sont exposés à un risque accru de collisions avec les véhicules, par rapport aux enfants plus âgés. Face à ces premiers résultats, plusieurs remarques s'imposent. Il serait tout d'abord pertinent d'élargir l'échantillon à des tranches d'âge plus larges. Cela permettrait d'apporter de nouvelles informations sur l'évolution de l'appétence pour le risque tout au long de l'enfance et de l'adolescence. En outre, l'inclusion d'un plus grand nombre

de sujets permettrait d'améliorer la puissance statistique de l'étude et de confirmer ou non la robustesse des tendances que nous observons. Par ailleurs, nous pourrions explorer l'impact du contexte socioculturel sur ces processus, facteur important sur la décision risquée et non exploré dans cette thèse (Defoe, 2021; Li, 2023; Spohn *et al.*, 2022). Des études interculturelles révèlent des variations dans l'attitude face au risque qui pourraient être reliées à des spécificités socioculturelles (*e.g.*, Amir *et al.*, 2018, 2020). La détection des facteurs qui influencent l'attirance pour le risque et la détermination de l'âge où ils deviennent significatifs, permettent d'élaborer des stratégies d'éducation et de prévention mieux adaptées et plus efficaces.

Le deuxième objectif de cette thèse est d'évaluer l'hypothèse selon laquelle la curiosité, ou l'attrait pour des nouvelles situations, influence la propension à favoriser des choix risqués. Pour approfondir la compréhension du rôle de ce facteur et son émergence précoce, nous adoptons une perspective comparative à la suite de recherches antérieures menées par Rivière et collaborateurs (2018, 2019). L'objectif de ces deux études était d'examiner l'hypothèse selon laquelle les individus ayant un comportement impulsif ou éprouvant des difficultés à inhiber un geste d'atteinte, expriment une préférence pour des options risquées. Les résultats montrent que des problèmes d'inhibition du geste d'atteinte peuvent influencer les décisions économiques chez les primates non-humain, mais non chez les enfants. Plus précisément, en adoptant le paradigme de Haun *et al.* (2011), les résultats indiquent que lorsque le contenu de l'option garantie est visuellement accessible, les mangabeys à collier blanc (*Cercocebus torquatus*) et les capucins bruns (*Sapajus apella*) diminuent significativement leur préférence pour l'option risquée, et cela, contrairement aux enfants. Ces résultats suggèrent que l'appétence au risque

économique observé chez les enfants ne peut être pas réduite à un déficit de contrôle inhibiteur. Suite à ces recherches, nous avons choisi de reprendre leur paradigme expérimental en y intégrant une situation dans laquelle l'option risquée présente un élément de nouveauté ou inattendu. Nous avons émis l'hypothèse selon laquelle l'attrait pour la nouveauté pourrait moduler la propension à prendre des risques. Nos résultats révèlent plusieurs aspects importants : (i) le niveau de néophilie semble être lié au comportement de prise de risque (cf. Roig *et al.*, 2022), (ii) la tendance à choisir la nouveauté est plus marquée lorsque celle-ci est associée à un risque plutôt qu'à une situation garantie. Toutefois, lorsque la situation est intrinsèquement risquée, l'association avec la nouveauté ne modifie pas la décision (cf. étude 2), et (iii) la présence de nouveauté dans un environnement réel entraîne un comportement moins prudent lors de traversée sur passage piéton (cf. étude 3). En résumé, l'introduction d'un élément nouveau ou inattendu dans un contexte de décision sous risque semble influencer le comportement de décision. À noter cependant que cette influence varie en fonction du degré de néophilie. En effet, chez les sujets néophobes, la présence de nouveauté entraîne une diminution de l'attraction pour le risque. À l'inverse, chez les néophiles, cette même nouveauté peut soit légèrement augmenter leur propension à prendre des risques, soit ne pas affecter leur préférence pour le risque. Néanmoins, chez les enfants âgés de 7 à 9 ans, cet attrait pour la nouveauté ne semble pas influencer les choix dans des contextes déjà caractérisés par un risque. Ce qui suggère que, dans cette tranche d'âge, l'attrait pour la nouveauté et la prise de risque pourraient être intrinsèquement liés (Nussenbaum *et al.*, 2022). De plus, lors de traversées pédestres dans un contexte réel, l'émergence d'un élément nouveau semble induire une attitude moins prudente.

Ces résultats soulignent l'interaction complexe qui existe entre la curiosité, la nouveauté et la prise de risque. Ils génèrent également d'autres questionnements. À l'instar de travaux en cours (e.g., Nussenbaum *et al.*, 2022) il serait intéressant d'élargir nos observations à d'autres groupes d'âge afin de mieux comprendre la trajectoire développementale de cette interaction. De même, les comparaisons interspécifiques pourraient être étendues à d'autres primates non-humains, voire à d'autres espèces animales, afin d'appréhender le phénomène dans une perspective phylogénétique plus large. En outre, ces résultats soulèvent des questions concernant la conception de stratégies d'éducation et d'intervention. Par exemple, comment pourrait-on utiliser l'attrait pour la nouveauté pour encourager une prise de risque plus réfléchie et responsable ? Ou encore, comment préparer les enfants à gérer l'apparition de nouvelles situations ou d'éléments inattendus dans leur environnement, de manière à minimiser les comportements à risque ?

Le troisième objectif de la présente thèse est d'explorer les corrélations entre des tâches de laboratoire, en l'occurrence, des jeux économiques et les tâches issues de contextes réalistes, en particulier un simulateur de traversée pédestre. Cette démarche vise à apporter des éclaircissements sur la problématique suivante : « Les comportements à risque dans le domaine économique sont-ils le miroir des comportements à risque dans le domaine physique ? ». Sur cette question, nous disposons désormais de quelques éléments de réponse. Il apparaît ainsi que les enfants dont le score de prise de risque économique est plus élevé ont tendance à adopter des comportements moins prudents concernant la traversée de route. En outre, nos résultats montrent que, malgré une attitude généralement prudente sur la route, le niveau de prise de

risque économique chez les enfants peut être corrélé à certains aspects du comportement de traversée, tels que le nombre de traversées, les délais d'initiation de la traversée et le nombre de collisions. Cela suggère un lien entre la prise de risque dans le domaine économique et celle observée dans d'autres contextes de la vie quotidienne. Cependant, cette étude soulève également de nouvelles questions. Les tendances observées chez les enfants persistent-elles à l'âge adulte ? Les mêmes schémas se retrouvent-ils dans des contextes culturels différents ou dans des situations risquées qui ne sont pas liées à la circulation routière ? En outre, il serait pertinent d'examiner d'autres facteurs susceptibles d'influencer la prise de risque tels que le tempérament, l'éducation et l'environnement socio-économique de l'individu. Une meilleure compréhension de ces facteurs pourrait permettre de développer des interventions plus ciblées pour promouvoir une prise de risque saine et responsable.

Comprendre la prise de décision sous risque chez les enfants nécessite une approche multidimensionnelle et intégrée. Nous avons mis en évidence l'influence de facteurs tels que l'âge ou l'attrait pour la nouveauté. Cependant, afin d'approfondir notre compréhension du comportement de prise de risque, il est nécessaire d'explorer d'autres dimensions. Nous nous pencherons donc sur plusieurs facteurs susceptibles d'éclairer nos résultats. En premier lieu, bien que l'impulsivité n'explique que très partiellement le comportement des enfants, les capacités de *self-control* et leur développement semblent être des facteurs clés pour comprendre la manière dont les enfants prennent des décisions face au risque. Ensuite, nous discuterons du rôle de la curiosité comme moteur de l'apprentissage et son lien avec le risque. L'attrait envers la nouveauté observé dès le début de la vie a peut-être un lien avec les comportements de prise de

risque observés ultérieurement. Nous discuterons d'une autre aptitude potentiellement explicative de nos résultats : la planification du futur. Une meilleure imagination du futur pourrait, en effet, diminuer l'appétence pour le risque et expliquer le comportement observé chez les adultes. Nous discuterons également des bénéfices et de l'intérêt d'une approche pluridisciplinaire, qui mêle psychologie du développement et cognition comparée. Enfin, nous discuterons de l'intérêt de l'utilisation de la réalité virtuelle pour étudier le comportement des enfants face au risque.

4.2. Le *self-control* et l'écologie du sujet : opportunités et maîtrise de soi

Les études de Rivière et collaborateurs publiées en 2018 et 2019 montrent que l'appétence au risque économique observée chez les jeunes enfants ne peut être réduite à un déficit d'inhibition motrice. Cependant, un renforcement des capacités de *self-control* pourrait permettre l'émergence d'un comportement plus prudent face au risque. Le *self-control* est une compétence cognitive complexe qui permet à un individu de réguler ses émotions, ses pensées et, *in fine*, ses actions (Defoe, 2021; Duckworth & Steinberg, 2015; Tao *et al.*, 2014). Bien que souvent associé à la maîtrise de l'impulsivité, la notion de *self-control* va plus loin, en offrant une possibilité de résilience (Defoe, 2021). Selon des modèles récents, le *self-control* se différencie en « bon *self-control* » et en « mauvais *self-control* » (Tao *et al.*, 2014). Le *bon self-control* correspond à la capacité à se détourner d'une récompense objective dans le but d'adopter un comportement plus prudent (*e.g.*, sélectionner une option moins risquée) tandis que le *mauvais self-control* se traduit par une tendance à privilégier des récompenses importantes sans tenir

compte des risques associés. Il est intéressant de noter que ces deux facettes du *self-control*, mutuellement inclusives, sont associées à des réseaux de neurones distincts. Le bon *self-control* est associé au cortex préfrontal, tandis que le mauvais *self-control* est lié à une activité striatale ventrale et amygdalienne. D'autres auteurs proposent une distinction des systèmes de *self-control* en deux dimensions, moins péjoratives et plus représentatives : une dimension cognitive et une dimension affective. Ces dimensions, qui se développent à des rythmes différents et peuvent parfois être en concurrence, semblent être étroitement liées à l'appétence au risque et à sa régulation. Des études, notamment celles de Levin et Hart (2007; 2003), montrent que la recherche de sensation et l'impulsivité¹⁴, sont associées à une propension plus élevée à choisir des options risquées chez les enfants âgés de 4 à 6 ans et prédisent un comportement décisionnel en faveur du risque dans le futur. L'aspect cognitif du *self-control*, lié à la maturation du lobe frontal, suit une trajectoire de développement distincte, avec une première amélioration significative observée autour de l'âge de six ans (cf. Tao *et al.*, 2014). La dimension affective du *self-control*, quant à elle, semble se développer plus tardivement, à la fin de l'adolescence. Ainsi, les adolescents se montrent plus enclins à prendre des risques que les adultes, particulièrement dans les tâches à forte charge affective. Ces résultats suggèrent que le *self-control* affectif des adolescents est encore en cours de développement par rapport à celui des adultes.

¹⁴ mesurées par le Big Five

Les résultats de nos propres études apparaissent cohérents avec cette perspective développementale du *self-control* cognitif. Nos recherches indiquent, en effet, que (i) les enfants âgés de deux ans et demi sont particulièrement enclins à prendre des risques, et (ii) un changement significatif dans l'attitude face au risque s'observe chez les enfants âgés de 9 ans, (*i.e.*, après la période de maturation du *self-control* cognitif). Cependant, il est à noter que les enfants testés dans nos tâches économiques manifestent une appétence pour le risque. Le premier changement, illustré par une diminution de la propension à choisir des options risquées chez les enfants âgés de sept à neuf ans, semble être de nature qualitative. Nos résultats, et le constat observé dans la littérature, suggèrent que les enfants pourraient initialement se diriger spontanément vers des options risquées, indépendamment de leurs avantages relatifs. Ensuite, ils apprendraient à travers leurs expériences du risque et de l'âge, à réduire leur engagement dans des actions désavantageuses, sans pour autant développer une aversion pour le risque. Dans un second temps, au sortir de l'adolescence, une stratégie d'évitement du risque semble se développer, permettant de minimiser les conséquences et les retombées émotionnelles négatives, comme le regret (cf. Habib & Cassotti, 2015 pour une revue détaillée). Une étude menée par Levin et collaborateurs (2007), conduite auprès de 80 enfants âgés entre 5 et 11 ans et 65 adultes, illustre l'hypothèse d'un développement du *self-control* en deux temps, lié au contexte de la prise de décision face au risque. Dans cette étude, ils varient la valeur attendue des situations risquées, créant ainsi des situations soit avantageuses, soit désavantageuses. Les résultats révèlent que les enfants âgés de 4 à 7 ans ont tendance à prendre des décisions favorables au risque quel que soit le caractère avantageux ou non de la situation. Cela suggère

que leur *self-control*, en particulier leur *self-control* cognitif, n'est pas suffisamment développé pour leur permettre d'évaluer correctement le rapport risque/récompense dans ces situations, alors que les adultes ont tendance à faire des choix qui sont à la fois avantageux et sûrs. Le groupe d'enfants âgés de 8 à 11 ans présente un comportement intermédiaire entre celui des plus jeunes enfants et celui des adultes. Cela suggère que leur *self-control* est en cours de développement, leur permettant de faire des choix moins impulsifs et plus avantageux, même s'ils sont encore plus susceptibles de prendre des risques que les adultes. Les études de Levin et coll., (2007; 2003) associées au modèle de Defoe et coll., (2021; 2019) suggèrent que le développement du *self-control* cognitif réduit les comportements impulsifs et favorise la prise de décisions plus avantageuses et moins risquées dans l'enfance. Ces études s'inscrivent dans une perspective plus large du développement de la prise de décision et du *self-control* tout au long de l'enfance et de l'adolescence. Comme le souligne la revue de Defoe et coll. (2019), le *self-control* affectif, qui se développe plus tard, joue également un rôle important, en particulier lorsqu'il s'agit de gérer les émotions associées à la prise de risque, pouvant expliquer l'apparente aversion au risque chez les adultes.

Bien qu'il puisse exister une corrélation entre le développement du *self-control* et la prise de décision risquée dans des contextes plutôt économiques, cela n'est peut-être pas le cas dans le domaine physique. En effet, au vu de l'ensemble des résultats récoltés dans le cadre de la présente thèse, les enfants semblent davantage prédisposés à prendre des risques dans le domaine économique que dans le domaine physique. Ce contraste peut s'éclairer à la lumière du modèle DNERM d'Ivy Defoe. Ce modèle suggère que la prise de risque chez les enfants et les

adolescents découle de l'interaction entre le développement (neurologique) du *self-control* et l'écologie de leur environnement (Defoe, 2021). Il met notamment en exergue l'influence de l'exposition au risque, autrement dit, l'accessibilité à des situations propices à la prise de risque. Selon Defoe, les adolescents seraient plus confrontés aux situations risquées que les enfants, ce qui pourrait, en partie, expliquer leur propension apparente à prendre plus de risques. Toutefois, lorsque l'exposition au risque est similaire pour tous les participants, comme c'est le cas dans les études en laboratoire ou dans certaines situations réelles telles que le franchissement d'un passage piéton, enfants et adolescents devraient théoriquement manifester une tendance similaire à la prise de risque (Defoe *et al.*, 2015). Cette hypothèse est confortée par les statistiques de mortalité et d'accidents rapportées par l'OSNIR (*i.e.*, Observatoire national interministériel de la sécurité routière), indiquant qu'en dépit d'une moindre exposition au trafic, les enfants âgés de moins de 13 ans représentent une part importante des victimes d'accidents de la route. Nos observations semblent en contradiction avec la prédiction du modèle DNERM ou des travaux antérieurs (cf. Hoffrage *et al.*, 2003). En effet, malgré leur prédisposition à prendre des risques dans le contexte économique, les enfants démontrent une aversion significative pour le risque dans les contextes physiques. Ces résultats apparaissent en contradiction avec l'idée que les enfants, possédant un *self-control* moins développé, sont plus enclins à prendre des risques lorsque les circonstances le permettent. Nos observations, notamment le fait que les enfants choisissent plus fréquemment de traverser dans les conditions les plus sûres, suggèrent une autre explication : les enfants pourraient avoir acquis une compréhension claire des règles et des dangers de la circulation routière grâce à l'éducation et à l'apprentissage (Morrongiello *et*

al., 2016). Ce sont peut-être ces règles que les adolescents décideraient de transgresser, confiants dans leurs capacités. Cependant, deux tendances distinctes émergent de nos résultats : (i) les enfants identifiés comme preneurs de risques dans le domaine économique sont également ceux qui manifestent le moins de prudence dans le domaine physique, et (ii) les plus jeunes semblent plus enclins à s'engager dans des situations risquées que les plus âgés sur le plan physique.

Au fil de notre examen des études existantes et de leur mise en perspective avec nos propres résultats, nous avons exploré l'appétence au risque chez les enfants en relation avec le développement de leur *self-control*, dans des contextes de risque économique et physique. Nos recherches montrent une diminution de la propension à choisir des options risquées à mesure que l'enfant grandit, soulignant ainsi un rôle potentiellement significatif du *self-control* dans le comportement de prise de risque. Nos résultats montrent également une divergence au niveau de la prise de risque entre le contexte économique et physique. Alors que les enfants affichent une aversion marquée pour le risque dans les situations physiques, ils sont parallèlement enclins à prendre des risques dans les situations économiques. Un tel contraste suggère que le développement du *self-control* ne représente pas l'unique facteur explicatif : les enfants pourraient ainsi avoir acquis une compréhension claire des règles et des dangers, au niveau de la circulation routière. Il est à noter, toutefois, que la compréhension et l'acquisition de telles règles correspondent à un processus lent, surtout lorsqu'il s'agit de leur mise en application pratique. Certains de nos résultats indiquent cependant une correspondance entre les domaines, car les enfants identifiés comme preneurs de risque dans le domaine économique sont ceux qui se

montrent le moins prudent dans le domaine physique. En outre, les plus jeunes restent généralement les moins prudents. Ces observations suggèrent que la prise de risque économique et physique chez les enfants n'est pas systématiquement corrélée et que l'influence du *self-control* peut varier en degré. Cette complexité nous invite à explorer d'autres pistes explicatives. Dans la prochaine section, nous discutons du rôle potentiellement *positif* de la prise de risque et de son lien éventuel avec le degré d'attrait pour la nouveauté. Il est possible, en effet, que la prise de risque ainsi que l'attrait envers les situations au caractère nouveau ou inconnu, deux comportements caractéristiques des enfants, soient deux expressions différentes de la même capacité précoce : l'exploration. Cette perspective implique que la prise de risque et l'exploration de la nouveauté sont intrinsèquement liées dans l'enfance, toutes deux contribuant à l'apprentissage et au développement. Ainsi, nous envisageons la prise de risque non plus seulement comme un comportement associé à des conséquences potentiellement indésirables, mais également comme un moteur essentiel de l'apprentissage et de la découverte. Les données provenant de notre étude comparative avec les singes capucins suggèrent que les individus manifestant une néophobie pourraient aussi manifester une certaine forme d'aversion au risque. Nos résultats ne permettent pas cependant d'affirmer un schéma phylogénétique clair reliant le degré de néophilie / néophobie à aversion / appétence pour le risque. Néanmoins, ils suggèrent que l'équilibre entre l'exploration et l'exploitation des ressources pourrait être modulé par le degré de néophilie ou de néophobie. Dans une perspective plus large, nous avançons l'hypothèse que l'exploration de l'environnement, une caractéristique fondamentale de l'apprentissage humain, aurait pu subir une exaptation au cours de notre évolution. Cela pourrait avoir conduit

l'être humain à adopter des formes d'exploration plus diversifiées, incluant notamment l'exploration de l'environnement informationnel.

4.3. Une curieuse histoire : Prendre des risques pour apprendre ?

Imaginons, l'espace d'un instant, la fête d'anniversaire d'un enfant de sept ans. Deux gâteaux sont posés sur la table. D'un côté, un fondant au chocolat, son gâteau préféré, une valeur sûre, et de l'autre, un gâteau bien étrange recouvert d'une ganache multicolore qu'il n'a jamais vu et dont le goût est un mystère. Un dilemme classique se pose : va-t-il choisir le gâteau familier ou prendre le risque de se laisser tenter par le gâteau inconnu ?

Cette simple illustration met en lumière un dilemme fondamental auquel un organisme, humain ou non, est continuellement confronté. Doit-on s'aventurer dans l'inconnu et prendre le risque de perdre du temps ou de s'engager dans une action qui pourrait s'avérer infructueuse voire dangereuse ? Ou bien doit-on plutôt exploiter les ressources et les informations déjà à notre disposition ? Ce dilemme, connu sous le nom *exploration-exploitation dilemma*, met en exergue deux types de comportements motivés par des objectifs distincts (Berger-Tal *et al.*, 2014; Mehlhorn *et al.*, 2015) Le premier, l'exploration, est un comportement consistant à s'aventurer dans des situations non familières ou incertaines. Ces situations peuvent s'avérer fructueuse non seulement en termes d'apprentissage ou d'expérience, mais également en termes de récompenses factuelles (*e.g.*, le goût du gâteau inconnu s'avère meilleur que celui familier). Le second, l'exploitation, consiste à sélectionner des options, connues ou sûres, renonçant ainsi à l'apprentissage que pourraient offrir les options incertaines.

Dans un contexte naturaliste, un organisme confronté à l'incertain doit adopter une stratégie d'exploration ou d'exploitation qui maximise sa fitness à long terme (Real, 1980; Real & Caraco, 1986). Cela implique, par exemple, de consacrer un temps et une énergie plus importante à l'exploration lorsque la probabilité de trouver des ressources alimentaires est faible. À l'inverse, si les ressources sont hautement prévisibles (*i.e.*, ont une probabilité élevée d'être trouvées) ou disponibles partout, la stratégie d'exploitation est privilégiée. L'adoption de l'une ou de l'autre de ces stratégies peut trouver une explication au regard de deux facteurs : l'état énergétique de l'individu (*i.e.*, la quantité de ressource qu'il possède déjà) et la valeur marginale que peut apporter la situation (*cf.* De Petrillo & Rosati, 2019, 2021; Real *et al.*, 1982). L'état énergétique de l'individu joue un rôle fondamental dans l'adoption de ces stratégies et influence sa propension à explorer une situation incertaine ou à se cantonner à l'exploitation de ressources garanties (Kacelnik & El Mouden, 2013). Un individu se trouvant dans un état énergétique positif est plus susceptible d'adopter une attitude favorable à l'exploitation des situations les moins risquées, alors que ce même individu dans un état énergétique négatif sera peut-être plus enclin à prendre des risques en quête de situations plus favorables (Mishra, 2014; Mishra *et al.*, 2012). En outre, le *théorème de la valeur marginale*, développé par Charnov (1976), suggère qu'un individu arrête d'exploiter une ressource ou un emplacement dès que la valeur marginale, obtenue pour chaque unité de temps investie, commence à décroître. Ainsi, la décision de s'engager et de s'engager dans une stratégie plutôt qu'une autre est liée à une évaluation préalable et continue de la valeur relative des informations ou des ressources potentiellement disponibles.

Considérons que l'état énergétique est analogue à l'état d'information ou de connaissance d'un individu (Golman & Loewenstein, 2018; Loewenstein, 1994; Wade & Kidd, 2019). Dans un contexte d'informations positives, c'est-à-dire d'un réservoir d'informations préalablement acquis, il peut être avantageux d'opter pour un résultat prévisible. Cela faciliterait, en effet, l'obtention directe d'une récompense. En revanche, dans un contexte d'informations négatives, caractérisé par un déficit de connaissances ou d'informations sur un sujet donné, la prise de risque et l'exploration constituent le seul passage vers l'apprentissage. Dans ce contexte, la prise de risque et l'exploration s'avèrent des outils essentiels pour naviguer efficacement dans un environnement caractérisé par l'incertitude et le manque d'informations.

Au travers d'une telle analyse, la propension apparente des enfants à prendre des risques peut être interprétée comme la manifestation d'une stratégie exploratoire motivée par la curiosité. La curiosité, concept multidimensionnel et délicat à circonscrire, est généralement comprise comme une motivation intrinsèque de l'individu à s'orienter vers de nouvelles sources d'informations ou des situations incertaines. L'objectif est de réduire l'incertitude, de satisfaire une attirance pour la nouveauté ou d'améliorer son apprentissage (Berlyne, 1954; Kidd & Hayden, 2015; Wade & Kidd, 2019). Le désir d'apprendre (curiosité de type-I) et la nécessité de diminuer l'incertitude dans une situation donnée (curiosité de type-D) constituent deux aspects de cette motivation (Litman, 2007). Il apparaît ainsi, que la curiosité est une force motrice puissante incitant l'exploration de situations incertaines. Les enfants, grands explorateurs par nature, sont souvent motivés par la curiosité et le désir d'apprendre pour le simple plaisir de la découverte. Cela peut les inciter à se risquer vers l'inconnu en dépit de la tentation de bénéfices

immédiats (E. Schulz *et al.*, 2019). L'exploration active de l'incertitude, stimulée par la curiosité, peut se révéler une stratégie efficace d'acquisition d'informations précieuses sur le long terme. Nos résultats mettent en évidence une préférence chez les jeunes enfants pour les situations à risque, indépendamment de leur nouveauté, tendance qui semble diminuer avec l'âge. Confrontés à des situations intrinsèquement risquées, familières ou non, les enfants ont tendance à privilégier le risque au détriment d'une récompense garantie. Ce qui est cohérent avec le fait que les enfants semblent structurer leurs activités dans le but de réduire l'incertitude entourant une situation peu familière ou qui ne fournit pas suffisamment d'informations permettant de la caractériser (Bonawitz *et al.*, 2011, 2012; Cook *et al.*, 2011; L. Schulz & Bonawitz, 2007). Cette tendance peut être interprétée comme une valorisation de l'information au détriment de la récompense immédiate, et explique pourquoi les enfants choisissent l'exploration plutôt que l'exploitation face à des situations risquées. Dans ce contexte, choisir une option risquée peut fournir une double récompense : des informations sur le degré d'incertitude et également un bénéfice potentiel. Le choix de l'option garantie entraîne, elle, une perte relative d'information. Ainsi, le « goût du risque » peut refléter une stratégie d'exploration guidée par le désir d'apprendre et de découvrir, avec l'information comme récompense intrinsèque (Gottlieb *et al.*, 2013). Cette exploration suivrait la règle suivante : "Si l'information semble plus précieuse que les récompenses, favorise la curiosité, sinon, cherche des récompenses" (Peterson & Verstynen, 2022). Dans cette perspective, les enfants privilégient la quête d'informations par rapport à la récompense immédiate, même si cela implique une prise de risque. Nos observations lors des simulations de traversée de route corroborent cette hypothèse avec des enfants

s'engageant davantage dans les situations risquées lorsqu'elles sont associées à un élément nouveau. Un tel comportement suggère que la nouveauté augmente l'attractivité de l'option risquée, rendant l'exploration subjectivement plus intéressante malgré le risque de conséquences indésirables.

Néanmoins, lorsque la nouveauté est dissociée du risque, les enfants ne privilégient pas systématiquement l'option inattendue (*cf.* étude 2). Cela suggère que l'attrait pour le risque, avec son potentiel d'apprentissage inhérent, prime sur la simple nouveauté chez les enfants. En outre, nos données révèlent que la proportion de choix risqués effectués par les enfants demeure égale, indépendamment de l'association du risque à la nouveauté. Chez les enfants, l'intérêt pour le risque n'est donc pas nécessairement renforcé par la nouveauté. Cette observation ouvre deux perspectives intéressantes. D'une part, il est envisageable que le risque en lui-même constitue un attrait, indépendamment de la recherche de nouveauté. Le comportement des enfants refléterait alors une stratégie d'exploration motivée par une volonté de réduction de l'incertitude, autrement dit, une curiosité dirigée (*i.e.*, Curiosité D). Dans ce contexte, l'acquisition d'informations constituerait une récompense dans la mesure où l'incertitude serait insupportable pour les enfants. Cette idée est cohérente avec le fait que, lors des jeux exploratoires, les enfants adoptent des règles d'arrêt de recherche différentes de celles des adultes et privilégient une exploration exhaustive de l'incertitude (Ruggeri *et al.*, 2016). D'autre part, la compréhension de nos données peut bénéficier de la prise en compte des travaux de Nussenbaum et collaborateurs (2022). Ces derniers montrent, en effet, qu'avant l'âge de 10 ans, les enfants ne distinguent pas clairement les situations nouvelles de celles qui sont familières

mais incertaines. Cette absence de distinction pourrait expliquer pourquoi les enfants choisissent des options risquées, qu'elles soient associées ou non à la nouveauté. Dans nos tâches, ainsi que dans celles d'études précédentes (cf. Rivière *et al.*, 2018, 2019), les enfants ont pu percevoir les situations comme similaires, car toutes offrent des occasions d'apprentissage. Ainsi, leur inclination pour le risque pourrait être stimulée par l'envie d'acquérir de nouvelles connaissances, que le contexte soit entièrement nouveau ou seulement simplement imprégné d'incertitude.

Parallèlement à nos travaux menés chez les enfants, nous avons conduit les mêmes expérimentations auprès de singes capucins (*Sapajus apella*), une espèce qui a divergé de notre propre lignée il y a environ 45 millions d'années (Perelman *et al.*, 2011). Ces derniers, préalablement étudiés pour leur aptitude à prendre des décisions économiques (e.g., Addessi *et al.*, 2007; De Petrillo *et al.*, 2015; Pelé *et al.*, 2014; Rivière *et al.*, 2019), ainsi que pour leur comportement face à de nouveaux objets ou aliments (e.g., Heuberger *et al.*, 2020; Visalberghi *et al.*, 2003), se révèlent un modèle particulièrement approprié pour examiner les dynamiques de l'interaction entre exploration et exploitation dans le contexte de la prise de décision risquée sous un angle évolutif (De Petrillo & Rosati, 2019, 2021).

Contrairement aux enfants, les capucins ont fait preuve d'une aversion pour le risque lorsqu'ils étaient placés devant des situations incertaines comportant un élément de nouveauté. En effet, ils ont majoritairement opté pour l'alternative la plus sûre. Cela diffère des résultats d'une étude antérieure (Rivière *et al.*, 2019) où les capucins manifestent une neutralité face au risque lorsque celui-ci ne comprends pas d'élément de nouveauté. Cela contraste encore

d'avantage avec une tendance générale à l'appétence pour le risque rapportée chez les capucins (cf. De Petrillo & Rosati, 2019) ainsi que dans des études menées sur d'autres primates utilisant un paradigme similaire (e.g., De Petrillo *et al.*, 2015; De Petrillo & Rosati, 2021; Haun *et al.*, 2011; Heilbronner *et al.*, 2008). Nos observations s'accordent cependant avec la néophobie généralement attribuée aux capucins (e.g., Heuberger *et al.*, 2020; Visalberghi *et al.*, 2003). Ainsi, il est plausible que, en fonction de leur environnement et de leur histoire évolutive, les capucins aient élaboré une stratégie distincte pour gérer l'incertitude, préférant opter pour la sécurité lorsque le risque est associé à la nouveauté. Cette démarche pourrait être interprétée comme une stratégie visant à minimiser le risque inhérent à l'incertitude de la nouveauté, tout en conservant une certaine flexibilité dans la gestion des risques au sein d'un environnement intrinsèquement risqué mais davantage familier. Ce paradoxe apparent pourrait trouver une résolution dans les interactions sociales des espèces (Forss *et al.*, 2017)

Enfin, un aspect supplémentaire de nos résultats concerne le changement de l'appétence pour le risque avec l'âge. Dans nos études (cf. étude 2 et 3), nous constatons une décroissance linéaire du choix en faveur du risque à mesure que l'âge des participants augmentait. Cette observation peut s'expliquer par un changement dans les stratégies utilisées concernant l'exploration et l'exploitation. L'exploration, qui implique l'appréciation des nouveautés et la prise de risque, serait davantage présente dans la petite enfance, période d'apprentissage intense. En revanche, l'exploitation, qui implique l'utilisation de connaissances et de compétences acquises, deviendrait prédominante à mesure que l'individu vieillit.

L'ensemble de nos résultats et de leurs interprétations suggèrent que la prise de risque, souvent stigmatisée, constitue un levier essentiel de l'apprentissage et une composante intégrante du comportement exploratoire chez les enfants. La compréhension de la manière dont les enfants gèrent le risque et l'incertitude, de même que les changements comportementaux observés au cours du développement, sont des questions de recherches essentielles, loin d'être « exotiques » (Sutter *et al.*, 2019). Les études futures explorant cette question pourraient contribuer à l'élaboration de méthodes d'enseignement ainsi que de campagnes de prévention qui tirent profit de ces stratégies naturelles d'exploration et d'apprentissage.

En outre, il apparaît plausible que le passage de l'exploration à l'exploitation puisse représenter une exaptation des stratégies optimisées de recherche. Autrement dit, les comportements exploratoires des enfants, quoiqu'ostensiblement guidés par la curiosité et l'apprentissage, pourraient en réalité représenter une réappropriation des stratégies de recherche optimisées qui ont évolué pour naviguer à travers l'incertitude environnementale et maximiser la fitness sur le long terme.

En conclusion, nos résultats suggèrent que la prise de risque peut être une composante intégrante du comportement exploratoire. Nous mettons en évidence que les enfants sont non seulement prêts à prendre des risques, mais que ce comportement résiste à divers contextes, qu'ils soient familiers ou nouveaux, économique ou physique. Cela met en évidence l'importance du risque et de l'incertitude dans la dynamique de l'exploration et de l'exploitation. Alors que les singes capucins semblent privilégier la sécurité de la familiarité, les enfants manifestent un attrait intrinsèque pour le risque qui paraît indépendant de la nouveauté de la situation. Ces différences

pourraient être le reflet d'adaptations évolutives en réponse aux environnements distincts dans lesquels humains et capucins évoluent. Elles pourraient également résulter de différences au cours du développement entre ces deux espèces. Afin de répondre à ces interrogations, la réalisation de recherches supplémentaires, adoptant une perspective à la fois développementale et comparative, est impérative. De telles études pourraient nous permettre de comprendre de manière plus nuancée comment l'exploration, l'exploitation, et le risque sont interconnectés.

La discussion préalable sur le *self-control* évoque le fait que les choix stratégiques des individus peuvent être fonctions de leur aptitude à réguler leurs pensées et leurs émotions. Suite à cela, nous mettons en lumière une liaison complexe et profonde entre la prise de décision et les stratégies d'exploration ou d'exploitation des ressources. Cette association pourrait être stimulée non seulement par une curiosité intrinsèque, mais aussi être une émanation de stratégies de recherche héritées, développées initialement pour naviguer dans un environnement incertain ou hostile. Dans la section suivante, nous abordons le potentiel lien entre la prise de risque et la capacité à se projeter mentalement dans le futur.

4.4. Décisions sous risque et voyages temporels : un avenir incertain à portée de choix

Ce domaine d'étude, encore peu exploré chez les enfants, soulève des questions captivantes sur les mécanismes susceptibles de jouer un rôle dans la prise de décision en situation de risque et son développement. Nous avançons l'hypothèse selon laquelle la compétence à envisager l'avenir – que ce soit par le biais de formes générales de pensée prospective ou bien de pensée épisodique tournée vers le futur – influence la façon dont les enfants évaluent et se

comportent face au risque. Nous nous penchons sur la manière dont ces éléments interagissent et comment nos propres résultats s'articulent avec cette hypothèse.

Les voyages mentaux dans le temps englobent une nébuleuse de capacités allant de la prospection - la capacité à « pré-expérimenter » un événement en le simulant mentalement (e.g., Gilbert & Wilson, 2007)- à la prévision émotionnelle - la capacité à prédire comment nous nous sentirons à l'avenir (cf. Wilson & Gilbert, 2003) – en passant par la pensée épisodique tournée vers le futur qui consiste à se projeter mentalement dans un événement futur personnel, spécifique et unique (cf. Atance & O'Neill, 2001).

La prise de risque implique, par définition, de prendre en compte une valeur à gagner ou à perdre, mais aussi de considérer les conséquences futures de ses choix, au *risque* de prendre des décisions désavantageuses ou non optimales. La prévision ou l'imagination du futur et la décision face au risque semblent ainsi partager une sémantique et un destin commun : prévoir le futur implique à un moment de prendre une décision et le risque précise les conséquences de cette décision, à savoir la probabilité des conséquences possibles de ses choix (Connell, 2009). En outre, comme le risque implique de s'engager dans l'éventualité de prévoir un aléa, d'espérer un gain, d'éviter une perte ou même d'éviter de ressentir des émotions négatives, il nécessite par essence une prévision.

La pensée prospective est une compétence complexe qui semble émerger précocement, mais qui se développe sur une longue période et n'atteint son plein potentiel que tardivement (Abram *et al.*, 2014; Atance & O'Neill, 2001; Ferretti *et al.*, 2018). Selon la revue de littérature conduite par Atance et O'Neil (2001), les enfants commencent à montrer des signes d'une

conscience personnelle du futur aux alentours de trois ans. Les analyses discursives des enfants âgés entre 2 et 3 ans montrent l'utilisation de termes modaux tels que « peut-être »¹⁵ ou « probablement »¹⁵, pour exprimer l'incertitude dans des situations liées à des événements en cours dans le monde physique, mais aussi en ce qui concerne les intentions et événements futurs. Cela suggère que les enfants basent leur discours projectif non seulement sur des expériences passées mais également y incluent de nouvelles projections, prédictions et hypothèses. Cependant, ces compétences précoces sont limitées et se consolident progressivement sur une longue période. Par ailleurs, la capacité à se projeter dans le futur, notamment de façon épisodique, doit être dissociée de l'instant présent, d'un désir ou d'un besoin immédiat pour être véritablement qualifiée de pensée future (au même titre que pour une décision éclairée en situation de risque) (Bischof-Köhler, 1985; Suddendorf *et al.*, 2009; Suddendorf & Corballis, 1997). Cette idée peut être illustrée par le fait de préparer un repas, car des invités sont attendus et non parce que nous avons faim. Des études ultérieures mettent en évidence, chez les enfants âgés entre 3 et 5 ans, des corrélations entre prise de décision, pensée future et diminution des décisions impulsives (Hanson *et al.*, 2014; Russell *et al.*, 2010). Il semble que la capacité à envisager les conséquences futures et personnelles de nos actions, de même qu'à les inclure dans nos décisions, émerge aux alentours de 4-5 ans et se consolide progressivement jusqu'à l'âge de 10 ans (Busby Grant & Suddendorf, 2009; Suddendorf & Busby, 2005). Plus précisément, à partir

¹⁵ Traduction libre

de 5 ans, les enfants montrent une aptitude croissante à établir des plans qui incluent la prévision d'un aléa éventuel, tel que le fait d'oublier quelque chose (Atance & O'Neill, 2001; Hudson *et al.*, 1995). Les enfants de cet âge montrent également une habileté croissante à prendre en compte les conséquences futures de leur comportement actuel (Suddendorf & Corballis, 2007; Thompson *et al.*, 1997). Enfin, dès l'âge de 4–5 ans, les enfants commencent à utiliser des détails spécifiques pour décrire des événements futurs (Suddendorf & Redshaw, 2013). Cependant, malgré une émergence précoce, les compétences de base nécessaires à l'imagination du futur ne semblent pas pleinement développées avant l'âge de huit ans (Abram *et al.*, 2014; Ferretti *et al.*, 2018; Gott & Lah, 2014).

À la lumière de ces observations rapportées dans la littérature, nos propres résultats montrent un pattern intéressant. Lors de nos expériences sur la prise de risque économique, les enfants âgés de sept et huit ans prennent davantage de risque que leurs homologues de neuf ans. De plus, lors de simulations de traversées routières, les enfants âgés de sept ans s'engagent plus tardivement sur les passages piétons que les enfants de neuf ans, surtout dans les situations les plus risquées. Ce retard expose potentiellement ces enfants à un nombre accru de collisions avec les véhicules. Face à un flux de voitures, les enfants les plus jeunes pourraient éprouver des difficultés à anticiper l'arrivée du prochain véhicule, d'où leur traversée plus tardive. À l'inverse, les enfants plus âgés pourraient anticiper cette arrivée plus tôt. Ces observations s'accordent avec les études précédentes soulignant une amélioration avec l'âge de l'anticipation et de la décision de traverser la route en fonction de l'espacement entre les véhicules et leur moment d'arrivée au passage piéton (Barton & Schwebel, 2007; Meir *et al.*, 2013, 2015; Plumert *et al.*,

2011; Tabibi *et al.*, 2012). Nos résultats s'accordent également avec le fait que la capacité à imaginer des événements futurs n'est pas entièrement développée avant l'âge de huit ans (Ferretti *et al.*, 2018). Il semble donc plausible que l'émergence progressive de la pensée future, en particulier le développement de la capacité à anticiper les conséquences futures de ses actions, puisse avoir une influence sur le comportement de prise de risque chez les enfants. Ainsi, les enfants plus jeunes, dont la capacité à se projeter dans le futur et à anticiper les répercussions potentiellement dangereuses de leurs actions est encore limitée, peuvent se comporter de manière plus risquée. En revanche, les enfants plus âgés, ayant plus d'expérience et une capacité accrue au niveau de la pensée future épisodique, s'avèreraient plus prudents. Au cours de nos passations, des observations « anecdotiques » méritent d'être mentionnées. Chez les enfants les plus âgés, certains expriment des intentions susceptibles d'être interprétées comme de la prévoyance pour le futur. Ainsi, certains demandent à l'expérimentateur si le risque choisi leur permet de partager les récompenses avec leurs pairs ou leurs frères et sœurs, indiquant une capacité potentielle à prévoir les conséquences futures de leurs actions. À l'inverse, les enfants les plus jeunes, tout en exprimant vouloir « tenter le risque » ou « jouer pour le hasard », semblent davantage axés sur l'obtention immédiate de la plus forte récompense : « avoir plus de chocolat ».

De telles observations suggèrent la nécessité d'explorer de manière plus systématique les verbalisations des enfants durant les tâches comportementales. De futures études peuvent ainsi analyser l'évolution de la sémantique du risque en relation avec la projection vers le futur chez les enfants. Il convient de noter que le lien entre la pensée future et la prise de décision sous

risque n'est peut-être pas systématique. En effet, certaines recherches récentes (Bulley *et al.*, 2019; Lombardi *et al.*, 2017) montrent un lien entre la pensée future et la prise de décision impliquant une dépréciation temporelle, mais pas une dépréciation probabiliste. Le rôle de la pensée future dans la prise de décision peut ainsi varier en fonction du type de décision à prendre, et être moins prépondérant dans le cas du risque. De telles études illustrent la complexité de la relation entre la pensée prospective et la prise de décision sous risque. Elles soulignent la nécessité de poursuivre les recherches dans ce domaine afin de mieux comprendre ces mécanismes complexes. Une extension de cette investigation à d'autres espèces, dans une perspective de cognition comparative, apparaît judicieuse. Jusqu'à présent, il existe peu d'études dans cette direction. Certes, des travaux sur les primates non-humains mettent en lumière leur capacité à prendre des décisions sous risque (e.g., De Petrillo & Rosati, 2021; Haun *et al.*, 2011; Nioche *et al.*, 2021; Pelé *et al.*, 2014) et à exprimer un comportement orienté vers le futur (e.g., Kabadayi & Osvath, 2017; Osvath, 2009; Osvath & Martin-Ordas, 2014), mais la littérature reste relativement silencieuse sur l'éventuel lien entre ces deux capacités. Dans le même registre, bien que des espèces aviaires telles que les corvidés, démontrent leur compétence à se remémorer des événements passés et à se projeter dans le futur (e.g., Cheke & Clayton, 2012; Clayton *et al.*, 2003), la façon dont ces compétences influencent leur attitude face au risque demeure largement méconnue dans la littérature existante. Plus loin sur l'arbre phylogénétique, les céphalopodes semblent manifester une habileté fascinante à adopter des comportements flexibles, tels que celui consistant à retarder la gratification afin d'obtenir un meilleur gain (e.g., Schnell *et al.*, 2021). Cependant, là encore, l'interaction entre leur disposition à manifester un comportement

tourné vers l'avenir et la prise de décision sous risque reste à déterminer. L'étude de ces espèces pourrait ouvrir des perspectives novatrices en ce qui concerne l'évolution des processus cognitifs liés à la prise de risque et à la projection dans le futur.

4.5. Quand la cognition comparée rencontre la psychologie du développement : un dialogue fructueux pour l'étude de la décision sous risque

L'étude de la cognition et du comportement bénéficie grandement de l'approche pluridisciplinaire. La synergie entre la psychologie du développement et la cognition comparée s'avère particulièrement fructueuse. En effet, chacune de ces disciplines apporte des modèles théoriques et des méthodologies expérimentales qui, combinées, génèrent de nouvelles perspectives scientifiques. Au niveau de notre domaine d'étude, la psychologie du développement contribue à l'analyse de la nature et du développement des facteurs sous-tendant la prise de décision sous risque. En outre, elle aide à l'élaboration de modèles raffinés des compétences et les processus cognitifs sous-tendant, dans notre cas, le développement de l'attitude face au risque. La cognition comparée offre, elle, une approche méthodologique et théorique permettant de comparer les comportements de prise de risque entre différentes espèces. Elle permet, ainsi, de relever des similarités et des divergences dans les comportements de prise de risque entre les enfants et des primates non-humains, éclairant ainsi les mécanismes évolutifs potentiels et les traits communs.

L'idée d'intégrer ces deux disciplines est loin d'être nouvelle. Depuis les premières études comparatives du comportement, l'importance de la perspective développementale est reconnue

(Bateson & Laland, 2013b; Tinbergen, 1963). Nikolaas Tinbergen, dans son article intitulé *On aims and methods of Ethology* (1963), insiste sur l'importance d'étudier le développement des individus en complémentarité avec des comparaisons interspécifiques. Il rejette l'idée selon laquelle les comportements spécifiques à une espèce découlent uniquement de la phylogenèse. Il souligne, au contraire, l'utilité d'observer le développement d'un individu et sa relation avec les exigences directes ou immédiates de l'environnement, et cela pour chaque espèce. Convaincu de l'utilité des méthodologies expérimentales et des modèles théoriques issus de ces deux approches, Tinbergen considère que ces deux disciplines peuvent devenir indissociables et conduire à des échanges intellectuels fructueux.

L'intégration de la psychologie du développement et de la cognition comparée, préconisée par Tinbergen, a déjà porté ses fruits. L'importance d'une telle approche pluridisciplinaire pour l'identification des compétences et des expressions comportementales spécifiques à certaines espèces, mais également des similarités entre les espèces, est ainsi récemment soulignée (e.g., Tomasello, 2000, 2019). Malgré tout, la mise en œuvre concrète d'une approche scientifique combinant la psychologie du développement et la cognition comparée demeure relativement discrète. Concernant les recherches chez les primates non-humains, une analyse récente de la littérature, basée sur le corpus du consortium *ManyPrimate* (ManyPrimates, Altschul, *et al.*, 2020) révèle des lacunes dans la prise en compte du développement individuel dans les comparaisons interspécifiques. Sur 574 études publiées entre 2014 et 2019 et portant sur la cognition des primates, seulement 17% intègrent une dimension développementale. Plus précisément, environ 10% de ces études présentent une analyse mixte

de groupes juvénile, infantile et adulte, tandis que 6% se concentrent spécifiquement sur des groupes infantiles et 2% uniquement sur des groupes juvéniles. Clairement, l'aspect développemental comparatif n'est pas la norme dans ces recherches.

Toutefois, l'intégration des deux approches permet d'obtenir des résultats intéressants grâce au transfert de concepts et de méthodologies. Des compétences précoces partagées sont ainsi mises en évidence dans le domaine social, celui de la théorie de l'esprit, ou encore de capacité à envisager le temps (Cf. Beck, 2017; Wolf & Tomasello, 2020). La compréhension de fausses croyances chez des enfants âgés de 15 mois et chez des grands singes est ainsi rapportée (e.g., Krupenye *et al.*, 2016; Southgate & Vernetti, 2014). L'aptitude de *voyager mentalement dans le temps* a été étudiée avec des méthodologies et des critères comportementaux similaires chez les enfants humains, les oiseaux et les grands singes (e.g, Clayton & Dickinson, 1998; Newcombe *et al.*, 2014; Redshaw & Suddendorf, 2016). L'entrecroisement de ces méthodologies et l'analyse des résultats qui en découlent ont, conformément aux souhaits de Tinbergen (1963, p. 423), donnés lieu à *de nombreuses discussions* (e.g., Clayton, 2015). Ainsi, les recherches impliquant des enfants révèlent, par exemple, un aspect crucial du voyage *mental dans le temps* : la nécessité de comprendre que le futur n'est pas prédéterminé (Beck, 2017), une faculté qui se développe avec l'âge et qui se retrouve à divers degrés chez d'autres espèces animales. Le dialogue en tandem entre la psychologie du développement et la cognition comparée peut générer de nouvelles idées, de nouveaux protocoles expérimentaux et concepts théoriques. À la suite de ce travail de thèse, nous sommes convaincus que l'étude de la prise de décision en

situation d'incertitude, et plus spécifiquement de l'attitude face au risque, peut largement bénéficier de cette intégration interdisciplinaire.

Dans le cadre de ce travail, nous avons enrichi notre compréhension de l'attitude face au risque en adaptant une méthodologie utilisée dans l'étude de la cognition chez les grands singes (Haun *et al.*, 2011) en y intégrant des concepts issus de l'économie comportementale (e.g., Kahneman & Tversky, 1979). Non seulement nous avons démontré qu'il existe des points de comparaison possibles entre les différentes disciplines (Rivière *et al.*, 2018, 2019; Roig *et al.*, 2022), mais nous avons aussi formulé des hypothèses difficilement testables sans une telle approche pluridisciplinaire. Nos observations révèlent que les enfants et les singes capucins adoptent une attitude différenciée face au risque lorsqu'un élément de nouveauté est présent. Ces résultats suggèrent l'existence de stratégies de gestion du risque différenciées qui se sont développées au cours de l'évolution et qui sont sans doute été modulées au cours du développement. Le dialogue entre la psychologie du développement et de la cognition comparée apporte une perspective plus holistique sur le développement du comportement de prise de risque. L'intégration de ces deux champs de recherche est essentielle pour une compréhension approfondie des stratégies d'approche ou d'évitement du risque, stratégies omniprésentes dans la vie quotidienne.

Toutefois, il convient de souligner un point important : les comparaisons jusqu'à présent n'ont généralement pas comparé des enfants humains avec les juvéniles d'autres espèces mais plutôt avec des adultes. Une telle approche est susceptible d'introduire un biais dans notre compréhension des phénomènes à l'œuvre dans le développement des comportements de prise

de risque. En effet, les capucins exhibent une attitude classiquement observée chez les êtres humains adultes (Kahneman & Tversky, 1979). L'ajout de juvéniles dans les échantillons pourrait apporter des éléments intéressants. Au regard de l'attitude néophobe de jeunes individus évoluant en milieu naturel comparativement aux plus vieux (e.g., Visalberghi & Fragaszy, 1995), nous pourrions observer des jeunes capucins soit preneurs de risque soit averses au risque mais, là, dans une moindre mesure que les adultes. La résolution de cette question permettrait de mettre en perspective les mécanismes précédemment discutés et de distinguer la part développementale de la part évolutive dans le changement d'attitude face au risque.

En outre, il semble également crucial d'examiner comment ces mécanismes cognitifs et évolutifs sous-jacents à la prise de risque sont influencés par des facteurs tels que l'environnement social, développemental et parental (Badyaev & Uller, 2009; Eckel *et al.*, 2012; Levin, Hart, *et al.*, 2007; Morrongiello *et al.*, 2019; Zoratto *et al.*, 2018). Des auteurs suggèrent que les effets parentaux sur le développement facilitent l'évolution par sélection naturelle en transférant les ressources de développement nécessaires pour reconstruire, maintenir ou modifier ce qui a été transmis (Badyaev & Uller, 2009). Dans cette perspective, il serait intéressant d'étendre l'étude de la prise de décision en situation de risque à l'interaction entre la dynamique sociale des espèces étudiées et l'influence des parents sur les stratégies comportementales face au risque. Il serait également pertinent d'étendre ces recherches développementales à d'autres espèces évoluant dans des environnements très différents. Cela nous permettrait de comparer de manière plus éclairée la prise de décision en situation de risque et son évolution développementale chez l'être humain avec celle observée chez d'autres espèces.

Il s'avérerait aussi pertinent d'inclure davantage de variables environnementales et d'examiner des espèces en milieu naturel plutôt qu'en captivité. Cela nous donnerait l'opportunité d'explorer des questions relatives à la disponibilité des ressources alimentaires et à la pression de prédation, facteurs qui conduisent à une grande diversité de situations à risque entre les espèces et qui influencent les stratégies de prise de décision.

En résumé, la recherche future sur la prise de risque a un large éventail de questions passionnantes à explorer, et l'intégration de la psychologie du développement et de la cognition comparée offre un cadre particulièrement adapté pour aborder ces questions de manière holistique et interdisciplinaire.

4.6. Exploration virtuelle : les jeux en réalité virtuelle comme outils d'étude de la prise de risque en situation réelle

La réalité virtuelle offre une modalité d'exploration nouvelle pour étudier la prise de risque dans des situations réelles. Cette technologie permet aux chercheurs de modéliser des environnements réalistes et contrôlés, créant ainsi une plateforme idéale pour l'étude des comportements humains dans des situations qui comportent du risque. Par ailleurs, les jeux en réalité virtuelle, grâce à leur nature immersive et interactive, permettent d'engager les participants dans un contexte proche de la réalité tout en leur permettant de se sentir en sécurité.

Historiquement, l'étude du comportement du piéton face au risque s'appuyait sur des méthodes exposant les sujets à des risques en situation réelle. Des techniques comme la

méthode "shout" ou la "two-step technique" (Demetre *et al.*, 1992), qui impliquent l'expression verbale ou le mouvement physique du sujet pour signaler une intention de traverser, ont ainsi été utilisées. Ces techniques présentent, toutefois, des lacunes. La méthode "shout", bien qu'utile pour évaluer la perception du trafic par le sujet, manque de réalisme, car l'action de traversée n'est pas concrètement réalisée. La "two-step technique", même si elle intègre une composante motrice, peut créer une dissociation entre la perception d'une opportunité de traversée et l'action réelle de traversée, pouvant ainsi mener à des erreurs dans l'évaluation du risque (Demetre *et al.*, 1992; Schwebel *et al.*, 2008). La technique intitulée "pretend road" (Barton & Schwebel, 2007; Lee *et al.*, 1984) a été mise en œuvre pour instaurer plus de réalisme. Cependant, elle est également sujette à des biais méthodologiques similaires. Malgré une approximation plus fidèle de la situation de traversée réelle — en demandant aux participants de traverser une route fictive tracée sur le trottoir en parallèle à une route réelle — elle peut, en effet, générer une dissociation entre la perception d'une opportunité de traversée et l'action réelle de traversée. De tels biais peuvent conduire à des distorsions dans l'évaluation du risque. En outre, à l'instar des méthodes antérieures, cette technique ne permettant pas d'expérimenter véritablement le risque, peut induire une surévaluation de la prise de risque (Barton & Schwebel, 2007). Toutefois, en dépit de leurs limitations, ces méthodologies apportent de précieuses informations concernant le comportement des enfants dans le contexte de traversée routière. En effet, elles démontrent que les enfants tendent à évaluer la sécurité de traversée sur la base de l'espace inter-véhiculaire plutôt que sur celle de la vitesse des véhicules. Plus particulièrement, ces études mettent en lumière le fait que les enfants plus jeunes (âgés de 4 à

6 ans) sont souvent enclins à négliger des occasions de traversée, à initier leur mouvement tardivement et à opter pour des espaces inter-véhiculaires insuffisamment larges. De surcroît, ces recherches montrent chez les jeunes participants des déficits en termes d'attention soutenue ou focalisée, une sensibilité accrue à la distraction ainsi qu'une aptitude à anticiper le trafic inférieure à celle des adultes (Barton & Schwebel, 2007; Demetre *et al.*, 1992; Dunbar *et al.*, 2001; Pless *et al.*, 1995).

Pour surmonter les limitations des premières approches expérimentales, en tenant compte de l'importance des enjeux et du risque réel d'accidents, les chercheurs se sont orientés, au début des années 2000, vers des techniques de simulation et des jeux. Ces méthodologies visent à reproduire le plus fidèlement possible les situations réelles de prise de risque sans mettre en péril les sujets d'étude. Certaines études sollicitent ainsi des présentations sur diapositives, des vidéos ou encore des jeux de plateau (Pitcairn & Edlmann, 2000; Thomson *et al.*, 1998, 2005; Whitebread & Neilson, 2000). Dans ces tâches, les enfants avaient à observer un trafic présenté ou décrit et indiquer leur volonté d'initiation de la traversée. Pitcairn et Edlmann (2000) présentent ainsi des vidéos de trafic, filmées dans les deux directions opposées, à des enfants âgés de 7 à 8 ans et à des adultes âgés de 18 à 26 ans. Les résultats montrent chez les plus jeunes, des négligences d'occasion de traverser, un délai d'initiation de l'action plus long et une prise de risque plus élevée (e.g. marge de manœuvre et espace inter-véhiculaire plus restreint). Ces expérimentations permettent d'étendre la validité des recherches antérieures et d'initier la tentative d'une taxonomie de l'attitude face au risque chez les enfants. Elles montrent ainsi, que la vitesse de décision des enfants est affectée par leur stratégie de recherche visuelle

(Whitebread & Neilson, 2000) et qu'il existe un déficit de jugement temporo-spatial qui semble moduler l'expression d'une attitude sécuritaire (Pitcairn & Edlmann, 2000; Van Schagen & Rothengatter, 1997). Cependant, ces méthodes, contrairement aux mesures plus « naturalistes » précédemment exposées, ne s'avèrent guère écologiques. Elles ne permettent pas de rendre compte, par exemple, de la coordination visuomotrice du sujet, ni de mesurer précisément des temps de réaction ou encore de généraliser les conclusions à des situations issues de la vie quotidienne (Deb *et al.*, 2017; Schwebel *et al.*, 2008; Simpson *et al.*, 2003).

Au cours des deux dernières décennies, des techniques de simulation informatisées plus précises ont vu le jour, permettant aux chercheurs de mesurer de façon plus fine le comportement des piétons traversant une route. Un nombre croissant de tâches composites ont été développées. Ces approches mixtes permettent non seulement d'observer une continuité avec les mesures antérieures (Schwebel *et al.*, 2008), d'établir des profils cognitifs des piétons (Barton & Morrongiello, 2011; Hoffrage *et al.*, 2003), et d'examiner l'utilisation de substituts, comme les jeux économiques, en tant que mesures proxy du risque en situation réelle (Morrongiello *et al.*, 2009, 2012). Ainsi, Hoffrage et collaborateurs (2003) utilisent une tâche s'inspirant de la technique des "deux pas", associée à un jeu sur ordinateur et à un jeu économique intitulé la "disaster task" qui consiste à sélectionner plusieurs boîtes parmi dix dans le but d'accumuler des autocollants. Une boîte sur dix peut entraîner la perte de tous les gains et l'arrêt du jeu.

Schwebel et collaborateurs (2008) proposent simulation informatique immersive et interactive de traversée à 102 enfants âgés de 7 à 9 ans et 74 adultes âgés de 21 ans. Celle-ci

consiste à observer une simulation sur trois écrans tout en se tenant sur un trottoir en bois et à descendre sur une plaque de pression au moment jugé opportun. L'utilisation de ces paradigmes conforte les résultats mentionnés précédemment et valide l'utilisation d'environnements virtuels pour étudier le comportement des piétons face au risque.

Toutefois, le manque de résolution des écrans ou le réalisme insuffisant de la simulation peut atténuer la sensibilité au risque des participants et plus particulièrement celle des enfants. Par exemple, dans la tâche de Schwebel et collaborateurs (2008), une fois le pied posé sur la plaque, une animation en 2D en vue aérienne remplace la simulation à la première personne où un personnage traverse la route sans s'arrêter. Le participant doit alors évaluer une situation qui ne correspond pas exactement à la situation de traversée et ne peut pas ajuster sa trajectoire en cas d'erreur. De la même manière, un retour sonore inadéquat peut compromettre la qualité du test et, par conséquent, son réalisme. La prise en compte de ces éléments peut expliquer pourquoi ces études indiquent une déficience dans l'initiation de la décision, même pour les situations sûres, ainsi qu'une augmentation de la prise de risque ou du taux d'accidents hypothétiques, comparativement aux tâches réalisées dans des environnements réels (Simpson *et al.*, 2003). Toutefois, les simulateurs offrent une amélioration qualitative et quantitative des données de validation (Hoffrage *et al.*, 2003; McComas *et al.*, 2002; Plumert *et al.*, 2004). Ils offrent des solutions pédagogiques moins onéreuses et plus durables (Thomson *et al.*, 2005). Aussi, ils augmentent les niveaux d'immersion et d'interaction entre le participant et l'environnement, facteurs essentiels pour la généralisation des résultats et la compréhension de la nature de la prise de risque (Schwebel *et al.*, 2008).

L'étude du comportement du piéton lors de la traversée de route est en constante évolution grâce à l'intégration de technologies et d'outils impliquant la réalité virtuelle (i.e., un environnement virtuel simulant la réalité) toujours plus performantes. Ces techniques offrent un niveau d'immersion et d'interaction plus proche de la réalité, sans pour autant exposer le participant à un risque physique réel. Le premier système développé, connu sous le nom de *Cave Automatic Virtual Environment* (CAVE, Cruz-Neira *et al.*, 1992), offre une expérience immersive totale, l'individu étant entouré d'écrans. Malgré son utilisation dans divers domaines¹⁶, son coût prohibitif et son absence de portabilité restreignent son usage, en particulier dans le cadre des études sur les traversées pédestres (Jiang *et al.*, 2018; Rahimian *et al.*, 2018; Ye *et al.*, 2020). Une alternative efficace réside dans les dispositifs montés sur la tête, (*HMD : Head Mount Device*) constituant l'outil de réalité virtuelle le plus couramment utilisé dans la recherche sur la sécurité routière (Simpson *et al.*, 2003). Cette technologie compense à la fois le manque d'immersion, en particulier sonore, et d'interactivité, tout en étant plus abordable et appropriée pour les programmes de prévention, un aspect crucial pour les institutions (Rothengatter, 1984a, 1984b) et pour la recherche. Les recherches menées à l'aide du HMD révèlent que les enfants âgés de 7 à 10 ans éprouvent des difficultés à évaluer et à anticiper correctement le flux de véhicules, ce qui les incite à prendre des risques plus importants, en particulier chez les plus jeunes (Deb *et al.*, 2017; e.g., Morrongiello *et al.*, 2015, 2016). D'autres études soulignent l'efficacité du HMD pour

¹⁶ *E.g.*, la modélisation moléculaire, la reconstitution de lieux ou encore la simulation de déplacements

sensibiliser à l'importance de la vigilance lors de la traversée de routes (Clancy *et al.*, 2006). Malgré certaines limites, telles que le coût, la résolution des écrans ou le champ de vision des casques, l'utilisation de la réalité virtuelle en condition immersive constitue un avantage significatif pour l'étude du comportement à risque, en particulier chez les enfants piétons. Les progrès technologiques dans le domaine de la réalité virtuelle permettent de mettre en place des programmes de prévention efficaces et personnalisés (Schwebel *et al.*, 2008; Thomson *et al.*, 2005; Ye *et al.*, 2020).

Suite à ces travaux, la présente thèse propose une nouvelle méthodologie afin d'étudier, chez les enfants, les comportements de prise de risque dans des situations écologiques. Nous avons développé un simulateur immersif et réaliste, simulant une situation de traversée piétonne, que nous avons combiné à une tâche de prise de décision économique avec une architecture de conséquence similaire. Notre simulateur de réalité virtuelle a été conçu en utilisant la plateforme Unreal Engine renommée pour ses graphismes de haute qualité et sa flexibilité de programmation, ce qui en fait un outil idéal pour créer des scénarios de simulation réalistes et interactifs. L'utilisation de cette plateforme permet une modélisation détaillée et fidèle des environnements urbains, rendant l'expérience utilisateur plus immersive et contribuant à la précision des données collectées. Pour des raisons pratiques et éthiques, nous avons choisi une alternative à l'utilisation traditionnelle de dispositifs de réalité virtuelle montés sur la tête. Nous avons opté pour une configuration plus accessible, impliquant une manette de jeu et un ordinateur portable. Cela facilite la participation des sujets et permet une plus grande flexibilité dans la conception de notre étude sans nuire à l'immersion des sujets. L'expérience

immersive de nos participants ne s'est trouvée en aucun cas diminuée par ce choix. En effet, au cours de la passation, les enfants manifestent des réactions spontanées telles que des sursauts et des comportements mimant ceux qu'ils auraient adoptés dans une situation réelle de traversée de route (e.g., une volonté d'accélération de leur démarche virtuelle). Ces comportements indiquent un degré d'immersion significatif démontrant que la réalité virtuelle, même lorsqu'elle est présentée via un ordinateur portable et une manette de jeu, est capable d'engager profondément les participants et de susciter des réactions comportementales analogues à celles attendues dans des situations réelles.

L'association de la réalité virtuelle avec l'économie comportementale offre des perspectives intéressantes pour la recherche future. Les systèmes de réalité virtuelle tels que celui développé dans la présente thèse, peuvent s'avérer utiles pour étudier les comportements des piétons dans une perspective développementale. Nous observons des comportements généralement prudents chez les enfants testés avec notre dispositif. Les participants les plus jeunes manifestent cependant une prudence moindre. Notre troisième étude montre également une corrélation entre les comportements de prise de risque exprimés dans des contextes différents, en l'occurrence physique et économique. En effet, les individus manifestant une propension à prendre des risques dans notre tâche économique s'avèrent également moins prudents dans une situation virtuelle de traversée de route. Cette correspondance entre les différentes formes de prise de risque met en évidence le potentiel de la réalité virtuelle comme outil d'évaluation comportementale dans divers contextes de prise de risque.

Il convient toutefois de noter que la taille et la diversité socio-culturelle de notre échantillon d'enfants relativement restreintes peuvent amoindrir la robustesse de nos résultats. Des études futures avec des échantillons plus importants et plus diversifiés s'avèrent nécessaires pour renforcer la validité de nos conclusions. En outre, bien que notre simulateur de réalité virtuelle démontre une forte capacité à engager les participants et à créer des situations réalistes, il reste encore des possibilités d'amélioration. Par exemple, le simulateur pourrait être développé pour inclure davantage de paramètres tels que des variations dans le trafic, la météo, le niveau de luminosité, une sonorité dynamique des véhicules et d'autres éléments qui pourraient influencer la prise de décision dans des situations réelles de traversée de route.

Enfin, il est à noter, que la présente thèse n'a pas mis en œuvre d'approche comparative proposant à des primates non humains des situations présentant un risque physique. Une telle perspective comparative a déjà prouvé son efficacité pour l'examen d'autres compétences (e.g., Allritz *et al.*, 2022; Dolins *et al.*, 2017) et a démontré sa pertinence dans un contexte développemental comparatif (Dolins *et al.*, 2014). Malgré son intérêt pour éclairer les aspects évolutifs et les fondements biologiques de la prise de risque, une telle approche pose des défis pratiques et éthiques significatifs. En effet, la création de simulations de réalité virtuelle qui engagent efficacement des primates non humains représente un important défi technique. En outre, sur le plan éthique, il est essentiel de garantir que les conditions expérimentales n'engendrent pas de stress ou de préjudice pour ces sujets animaux. Là encore, pour qu'une perspective comparative enrichisse notre compréhension de la prise de risque, son application exige une mise en œuvre rigoureuse.

Conclusion générale

Bien que les notions de risques et de décision sous risque soient ancrées dans une longue histoire étymologique et théorique (cf. Pradier, 2006), leurs dimensions développementale et phylogénétique n'ont été étudiées que récemment (Harbaugh *et al.*, 2002; Heilbronner, 2017). Ces dimensions, cruciales pour comprendre l'émergence et l'évolution de la prise de décision face au risque, sont au cœur de ce travail de thèse. Ce dernier fait appel à des comparaisons interspécifiques et explore les interactions entre les risques physique et économique. Notre conclusion générale propose une brève synthèse de nos travaux, une mise en perspective de nos principaux résultats et une ouverture sur des pistes de recherches futures pour continuer d'explorer la prise de décision sous risque.

La première étude empirique de cette thèse (cf. 3.1), publiée dans *Journal of Comparative Psychology* (Roig *et al.*, 2022), est une étude comparative entre enfants humains et singes capucins hébergés au Centre de primatologie de Strasbourg. Elle explore les similitudes et les divergences manifestées au niveau de l'expression de l'attitude face au risque. Nous mettons en évidence que la présence de nouveauté est liée, a minima, au schéma d'expression de l'attitude face au risque. Ce premier article, qui soulève davantage de questions qu'il n'apporte de réponses, suggère que l'attitude face au risque est l'expression de comportements motivés soit par une stratégie d'exploration, soit par une stratégie d'exploitation. Comme cela nous a été suggéré lors de la présentation de nos résultats dans un colloque scientifique, il serait intéressant de pousser plus loin l'analyse en observant les schémas de sélection afin de vérifier si les sujets

explorent vraiment les options (*cf.* Lacombe *et al.*, 2022 pour une discussion à ce sujet). Par ailleurs, l'augmentation de l'étendue des âges des participants humains et non-humains pourrait permettre des comparaisons plus éclairantes.

Notre deuxième article (*cf.* 3.2) porte sur une période supposée charnière de la décision sous risque, soit entre 7 et 9 ans (Paulsen *et al.*, 2012). Nos résultats permettent de cerner plus précisément la trajectoire développementale de la décision face au risque. À l'encontre des suppositions de certains auteurs, nous observons que cette trajectoire ne conduit pas du goût du risque à son rejet, mais seulement à une moindre appétence pour le risque. Notre étude suggère également que l'attrait pour la nouveauté et l'appétence pour le risque peuvent se confondre à un jeune âge et se distinguer plus clairement au cours du développement de l'enfant (*cf.* Nussenbaum *et al.*, 2022). Grâce au soutien des centres de loisirs de la ville de Rouen et de son agglomération, nous avons pu compenser le retard dû au confinement sanitaire lié à l'épidémie de COVID-19. Le recrutement des participants dans ces centres de loisirs a permis de tester les enfants dans un environnement idéal, écologique et non anxiogène, et d'éliminer le biais d'auto-sélection¹⁷. Néanmoins, la diversité des tranches d'âge et des facteurs abordés dans cette étude demeure limitée. Des recherches supplémentaires s'avèrent ainsi nécessaires pour confirmer ou

¹⁷ Le biais d'auto-sélection, est un type de biais de sélection qui se produit lorsque les participants se sélectionnent eux-mêmes pour participer à une étude ou à une enquête. Cela signifie que les personnes qui choisissent de participer sont potentiellement différentes de celles qui ne le font pas, ce qui peut rendre l'échantillon non représentatif de la population dans son ensemble. Il s'agit d'un biais important à éviter lorsque l'objectif est d'étudier l'appétence pour le risque.

infirmes nos résultats. Il nous apparaît également pertinent d'appliquer notre paradigme expérimental à d'autres contextes socioculturels. Quoi qu'il en soit, nos résultats soulèvent une perspective intéressante : la prise de risque chez le jeune enfant peut refléter une stratégie d'apprentissage. Cela est susceptible d'avoir des implications importantes dans les stratégies de prévention ou de gestion du risque auprès des enfants.

Enfin, notre troisième étude (*cf.* 3.3) associe un jeu économique et un jeu en réalité virtuelle simulant un risque physique. Nous mettons en évidence des similitudes intéressantes entre ces deux domaines. Parmi celles-ci, le fait que les enfants identifiés comme preneurs de risques dans un domaine (*i.e.*, économique) s'avèrent également moins prudents dans l'autre. Ces comparaisons ont été rendues possibles grâce à l'utilisation de deux situations partageant la même structure théorique des gains et des pertes, un point qui a été peu exploré auparavant (*cf.* Morrongiello *et al.*, 2009, 2012, 2015). Toutefois, il convient de noter que la situation de traversée de route n'est qu'un exemple parmi d'autres situations de risques physiques auxquels les enfants peuvent être confrontés. Il nous semble ainsi judicieux d'explorer dans le futur, d'autres situations physiques. Une telle extension est importante, non seulement pour sa valeur théorique, mais aussi pour son utilité dans les stratégies de prévention et de sensibilisation au risque. La mise en évidence des particularités propres aux enfants dans ces situations permettrait, en effet, de développer des politiques plus ciblées et plus efficaces. Par ailleurs, l'outil de simulation que nous avons développé pourrait être enrichi et amélioré afin de mieux coller à la réalité.

Ces études, bien que réalisées indépendamment les unes des autres, convergent pour former une image plus holistique de la prise de décision sous risque. Elles suggèrent non seulement que nos comportements face au risque peuvent être enracinés dans notre héritage évolutif, mais aussi que ces comportements hautement flexibles peuvent être façonnés et modifiés tout au long de notre développement en fonction de notre environnement décisionnel. Nos études suggèrent que ces comportements ne sont ni statiques ni homogènes, mais sont façonnés, affinés et modifiés tout au long de notre développement, et sont étroitement interconnectés avec d'autres aptitudes. Nos travaux mettent ainsi en évidence le rôle potentiel de l'attrait pour la nouveauté, et possiblement de la curiosité, dans l'appétence au risque. Ils suggèrent également que l'attitude face au risque résulte d'une tension dynamique entre une stratégie d'exploration et celle d'exploitation (*cf.* Kidd & Hayden, 2015; Mehlhorn *et al.*, 2015).

Afin d'approfondir notre compréhension des multiples dimensions intrinsèques à la prise de décision sous risque, il s'avère crucial de poursuivre l'examen de ses mécanismes sous-jacents. Cela nécessite une exploration dans divers contextes et différentes phases de développement, non seulement chez l'espèce humaine, mais aussi chez d'autres espèces dont certaines présentent des parallèles développementaux avec la nôtre (*cf.* Rosati *et al.*, 2023). Dans ce cadre, les outils de simulation, comme ceux que nous avons développés, jouent un rôle important en permettant d'examiner la prise de décision sous risque dans des environnements qui simulent de près la réalité.

En mettant en exergue le rôle de facteurs tels que l'âge, la curiosité, l'environnement et l'évolution dans la prise de décision sous risque, ce travail de thèse souligne la nécessité

d'adopter une vision holistique. La prise de décision sous risque ne correspond pas, en effet, à une entité monolithique mais résulte de l'interaction complexe de plusieurs facteurs. De nombreuses questions restent, cependant, sans réponses et divers aspects de la prise de décision sous risque requièrent des investigations poussées. La seule certitude que nous avons, c'est que l'incertitude fait toujours partie du jeu.

Références

- Abdellaoui, M., & Wakker, P. P. (2020). Savage for dummies and experts. *Journal of Economic Theory*, 186, 104991. <https://doi.org/10.1016/J.JET.2020.104991>
- Abram, M., Picard, L., Navarro, B., & Piolino, P. (2014). Mechanisms of remembering the past and imagining the future – New data from autobiographical memory tasks in a lifespan approach. *Consciousness and Cognition*, 29, 76–89.
<https://doi.org/10.1016/J.CONCOG.2014.07.011>
- Académie française. (1694). Risque. In *Dictionnaire de l'Académie française dédié au Roy* (1st ed., p. 412).
- Addressi, E., Crescimbene, L., & Visalberghi, E. (2007). Do capuchin monkeys (*Cebus apella*) use tokens as symbols? *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 274(1625), 2579–2585. <https://doi.org/10.1098/rspb.2007.0726>
- Allais, M. (1953). Le Comportement de l'Homme Rationnel devant le Risque: Critique des Postulats et Axiomes de l'Ecole Americaine. *Econometrica*, 21(4), 503.
<https://doi.org/10.2307/1907921>
- Allais, M. (1989). Les lignes directrices de mon œuvre (conférence Nobel prononcée devant l'Académie royale des sciences de Suède le 9 décembre 1988). *Annales d'Économie et de Statistique*, 14, 1–23. <https://doi.org/10.2307/20075737>
- Allritz, M., Call, J., Schweller, K., McEwen, E. S., de Guinea, M., Janmaat, K. R. L., Menzel, C. R., & Dolins, F. L. (2022). Chimpanzees (*Pan troglodytes*) navigate to find hidden fruit in a

virtual environment. *Science Advances*, 8(25), eabm4754.

<https://doi.org/10.1126/sciadv.abm4754>

Amir, D., Jordan, M. R., Mcauliffe, K., Valeggia, C. R., Sugiyama, L. S., Bribiescas, R. G., Snodgrass, J. J., & Dunham, Y. (2020). The developmental origins of risk and time preferences across diverse societies. *Journal of Experimental Psychology: General*, 149(4), 650–661. <https://doi.org/10.1037/xge0000675>

Amir, D., Jordan, M. R., & Rand, D. G. (2018). An uncertainty management perspective on long-run impacts of adversity: The influence of childhood socioeconomic status on risk, time, and social preferences. *Journal of Experimental Social Psychology*, 79, 217–226. <https://doi.org/10.1016/j.jesp.2018.07.014>

Andersen, S., Ertac, S., Gneezy, U., List, J. A., & Maximiano, S. (2013). Gender, Competitiveness, and Socialization at a Young Age: Evidence From a Matrilineal and a Patriarchal Society. *The Review of Economics and Statistics*, 95(4), 1438–1443. https://doi.org/10.1162/REST_A_00312

Andreoni, J., Di Girolamo, A., List, J. A., Mackevicius, C., & Samek, A. (2020). Risk preferences of children and adolescents in relation to gender, cognitive skills, soft skills, and executive functions. *Journal of Economic Behavior & Organization*, 179, 729–742. <https://doi.org/10.1016/j.jebo.2019.05.002>

ASAB/ABS. (2020). Guidelines for the treatment of animals in behavioural research and teaching. *Animal Behaviour*, 159, I–XI. <https://doi.org/10.1016/j.anbehav.2019.11.002>

- Atance, C. M., & O'Neill, D. K. (2001). Episodic future thinking. *Trends in Cognitive Sciences*, 5(12), 533–539. [https://doi.org/10.1016/S1364-6613\(00\)01804-0](https://doi.org/10.1016/S1364-6613(00)01804-0)
- Badyaev, A. V., & Uller, T. (2009). Parental effects in ecology and evolution: mechanisms, processes and implications. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 364(1520), 1169–1177. <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0302>
- Bar-Hillel, M. (2001). Subjective Probability Judgments. In *International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B0-08-043076-7/00637-9>
- Barton, B. K., & Morrongiello, B. A. (2011). Examining the Impact of Traffic Environment and Executive Functioning on Children's Pedestrian Behaviors. *Developmental Psychology*, 47(1), 182–191. <https://doi.org/10.1037/a0021308>
- Barton, B. K., & Schwebel, D. C. (2007). The roles of age, gender, inhibitory control, and parental supervision in children's pedestrian safety. *Journal of Pediatric Psychology*, 32(5), 517–526. <https://doi.org/10.1093/jpepsy/jsm014>
- Bates, D., Maechler, M., Bolker, B., & Walker, S. (2015). Fitting Linear Mixed Effects Models Using lme4. *Journal of Statistical Software*, 67(1), 1-48. <https://doi.org/10.18637/jss.v067.i01>
- Bateson, P., & Laland, K. N. (2013a). On current utility and adaptive significance: a response to Nesse. *Trends in Ecology & Evolution*, 28(12), 682–683. <https://doi.org/10.1016/J.TREE.2013.10.009>

Bateson, P., & Laland, K. N. (2013b). Tinbergen's four questions: an appreciation and an update. *Trends in Ecology & Evolution*, 28(12), 712–718.

<https://doi.org/10.1016/J.TREE.2013.09.013>

Bechara, A., Damasio, A. R., Damasio, H., & Anderson, S. W. (1994). Insensitivity to future consequences following damage to human prefrontal cortex. *Cognition*, 50(1-3), 7–15.

[https://doi.org/10.1016/0010-0277\(94\)90018-3](https://doi.org/10.1016/0010-0277(94)90018-3)

Beck, S. R. (2017). Interaction between comparative psychology and cognitive development. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, 16, 138–141.

<https://doi.org/10.1016/J.COBEHA.2017.07.002>

Bencheikh, O. (2002). Le français risque et l'arabe رزق [rizq]. *Bulletin de La SELEFA*, 1(1), 19–24.

Berger-Tal, O., Nathan, J., Meron, E., & Saltz, D. (2014). The exploration-exploitation dilemma: a multidisciplinary framework. *PloS ONE*, 10(3) : e0119116.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0119116>

Berlyne, D. E. (1954). A theory of human curiosity. *British Journal of Psychology*, 45(3), 180–191.

<https://doi.org/10.1111/j.2044-8295.1954.tb01243.x>

Berlyne, D. E. (1966). Curiosity and Exploration: Animals spend much of their time seeking stimuli whose significance raises problems for psychology. *Science*, 153(3731), 25–33.

<https://doi.org/10.1126/science.153.3731.25>

Bernoulli, D. (1954). Exposition of a New Theory on the Measurement of Risk. *Econometrica*, 22(1), 23–36. <https://doi.org/10.2307/1909829>

- Bernoulli, D. (1985). Esquisse d'une théorie nouvelle de mesure du sort. *Cahiers Du Séminaire d'histoire Des Mathématiques*, 6(1985), 61–77.
http://www.numdam.org/item?id=CSHM_1985_6_61_0
- Bernstein, P. L. (1998). *Against the Gods - The Remarkable True Story of Risk*. John Wiley & Sons. <https://www.wiley.com/en-us/Against+the+Gods%3A+The+Remarkable+Story+of+Risk-p-9780471295631>
- Bischof-Köhler, D. (1985). Zur Phylogenese menschlicher Motivation. In L.H. Eckensberge & E.D. Lantermann (Eds.), *Emotion und Reflexivität* (pp. 3-47). <https://epub.ub.uni-muenchen.de/2921/1/2921.pdf>
- Blanco, N. J., & Sloutsky, V. M. (2020). Systematic exploration and uncertainty dominate young children's choices. *Developmental Science*, 24(2), e13026.
<https://doi.org/10.1111/desc.13026>
- Blanco, N. J., & Sloutsky, V. M. (2020). Attentional mechanisms drive systematic exploration in young children. *Cognition*, 202, 104327.
<https://doi.org/10.1016/j.cognition.2020.104327>
- Bonawitz, E., Shafto, P., Gweon, H., Goodman, N. D., Spelke, E., & Schulz, L. (2011). The double-edged sword of pedagogy: Instruction limits spontaneous exploration and discovery. *Cognition*, 120(3), 322–330. <https://doi.org/10.1016/J.COGNITION.2010.10.001>
- Bonawitz, E., van Schijndel, T. J. P., Friel, D., & Schulz, L. (2012). Children balance theories and evidence in exploration, explanation, and learning. *Cognitive Psychology*, 64(4), 215–234. <https://doi.org/10.1016/j.cogpsych.2011.12.002>

- Boyer, T. W. (2006). The development of risk-taking: A multi-perspective review. *Developmental Review, 26*(3), 291–345. <https://doi.org/10.1016/J.DR.2006.05.002>
- Brand, J. A., Henry, J., Melo, G. C., Wlodkowic, D., Wong, B. B. M., & Martin, J. M. (2023). Sex differences in the predictability of risk-taking behavior. *Behavioral Ecology, 34*(1), 108–116. <https://doi.org/10.1093/beheco/amac105>
- Broihanne, M.-H., Romain, A., Call, J., Thierry, B., Wascher, C.A.F., De Marco, A., Verrier, D., & Dufour, V. (2019). Monkeys (*Sapajus apella* and *Macaca tonkeana*) and great apes (*Gorilla gorilla*, *Pongo abelii*, *Pan paniscus*, and *Pan troglodytes*) play for the highest bid. *Journal of Comparative Psychology, 133*(3), 301-312. <https://doi.org/10.1037/com0000153>
- Brosnan, S. F. (2021). What behaviour in economic games tells us about the evolution of non-human species' economic decision-making behaviour. *Philosophical Transactions of the Royal Society B, 376*(1819). <https://doi.org/10.1098/RSTB.2019.0670>
- Brosnan, S. F., Beran, M. J., Parrish, A. E., Price, S. A., & Wilson, B. J. (2013). Comparative Approaches to Studying Strategy: Towards an Evolutionary Account of Primate Decision Making. *Evolutionary Psychology, 11*(3), <https://doi.org/10.1177/147470491301100309>
- Brosnan, S. F., & Wilson, B. J. (2023). Comparative economics: how studying other primates helps us better understand the evolution of our own economic decision making. *Philosophical Transactions of the Royal Society B, 378*(1876). <https://doi.org/10.1098/RSTB.2021.0497>

- Buelow, M. T., Jungers, M. K., Parks, C., & Rinato, B. (2022). Contextual Factors Affecting Risky Decision Making: The Influence of Music on Task Performance and Perceived Distraction. *Frontiers in Psychology*, 13, 818689.
<https://doi.org/10.3389/FPSYG.2022.818689>
- Bulley, A., Miloyan, B., Pepper, G. V., Gullo, M. J., Henry, J. D., & Suddendorf, T. (2019). Cuing both positive and negative episodic foresight reduces delay discounting but does not affect risk-taking. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 72(8), 1998–2017.
<https://doi.org/10.1177/1747021818819777>
- Burnett, S., Bault, N., Coricelli, G., & Blakemore, S. J. (2010). Adolescents' heightened risk-seeking in a probabilistic gambling task. *Cognitive Development*, 25(2), 183–196.
<https://doi.org/10.1016/j.cogdev.2009.11.003>
- Busby Grant, J., & Suddendorf, T. (2009). Preschoolers begin to differentiate the times of events from throughout the lifespan. *European Journal of Developmental Psychology*, 6(6), 746–762. <https://doi.org/10.1080/17405620802102947>
- Byrnes, J. P., Miller, D. C., & Schafer, W. D. (1999). Gender Differences in Risk Taking: A Meta-Analysis. *Psychological Bulletin*, 125(3), 367–383. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.125.3.367>
- Canessa, N., Crespi, C., Motterlini, M., Baud-Bovy, G., Chierchia, G., Pantaleo, G., Tettamanti, M., & Cappa, S. F. (2013). The Functional and Structural Neural Basis of Individual Differences in Loss Aversion. *Journal of Neuroscience*, 33(36), 14307–14317.
<https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.0497-13.2013>

Caraco, T. (1980). On Foraging Time Allocation in a Stochastic Environment. *Ecology*, 61(1), 119–128. <https://doi.org/10.2307/1937162>

Cárdenas, J. C., Dreber, A., von Essen, E., & Ranehill, E. (2012). Gender differences in competitiveness and risk taking: Comparing children in Colombia and Sweden. *Journal of Economic Behavior & Organization*, 83(1), 11–23. <https://doi.org/10.1016/J.JEBO.2011.06.008>

Castillo, M., Jordan, J. L., & Petrie, R. (2018). Children’s rationality, risk attitudes and field behavior. *European Economic Review*, 102, 62–81. <https://doi.org/10.1016/j.euroecorev.2017.12.002>

Charness, G., & Gneezy, U. (2012). Strong Evidence for Gender Differences in Risk Taking. *Journal of Economic Behavior and Organization*, 83(1), 50–58. <https://doi.org/10.1016/j.jebo.2011.06.007>

Charnov, E. L. (1976). Optimal foraging, the marginal value theorem. *Theoretical Population Biology*, 9(2), 129–136. [https://doi.org/10.1016/0040-5809\(76\)90040-X](https://doi.org/10.1016/0040-5809(76)90040-X)

Chein, J. M., Albert, D., O’Brien, L., Uckert, K., & Steinberg, L. (2011). Peers increase adolescent risk taking by enhancing activity in the brain’s reward circuitry. *Developmental Science*, 14(2), 1–11. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2010.01035.x>

Cheke, L. G., & Clayton, N. S. (2012). Eurasian jays (*Garrulus glandarius*) overcome their current desires to anticipate two distinct future needs and plan for them appropriately. *Biology Letters*, 8(2), 171–175. <https://doi.org/10.1098/rsbl.2011.0909>

- Chen, M. K., Lakshminarayanan, V., & Santos, L. R. (2006). How basic are behavioral biases? Evidence from capuchin monkey trading behavior. *Journal of Political Economy*, 114(3), 517–537. <https://doi.org/10.1086/503550>
- Chesterton, G. K. (1908). *Orthodoxy* (1st ed.). John Lane Company.
- Clancy, T. A., Rucklidge, J. J., & Owen, D. (2006). Road-crossing safety in virtual reality: A comparison of adolescents with and without ADHD. *Journal of Clinical Child & Adolescent Psychology*, 35(2), 203–215. https://doi.org/10.1207/s15374424jccp3502_4
- Clayton, N. S. (2015). EPS Mid-Career Award 2013 : Ways of thinking: from crows to children and back again. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 68(2), 209–241. <https://doi.org/10.1080/17470218.2014.943673>
- Clayton, N. S., Bussey, T. J., & Dickinson, A. (2003). Can animals recall the past and plan for the future? *Nature Reviews Neuroscience*, 4(8), 685–691. <https://doi.org/10.1038/nrn1180>
- Clayton, N. S., & Dickinson, A. (1998). Episodic-like memory during cache recovery by scrub jays. *Nature*, 395(6699), 272–274. <https://doi.org/10.1038/26216>
- Cohen, J.D., McClure, S.M., & Yu, A.J. (2007). Should I stay or should I go? How the human brain manages the trade-off between exploitation and exploration. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 362(1481), 933–942. <https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2098>
- Connell, D. J. (2009). Planning and its Orientation to the Future. *International Planning Studies*, 14(1), 85–98. <https://doi.org/10.1080/13563470902741609>
- Constantinople, C. M., Piet, A. T., & Brody, C. D. (2019). An Analysis of Decision under Risk in Rats. *Current Biology*, 29(12), 2066–2074. <https://doi.org/10.1016/J.CUB.2019.05.013>

Cook, C., Goodman, N. D., & Schulz, L. (2011). Where science starts: spontaneous experiments in preschoolers' exploratory play. *Cognition*, *120*(3), 341–349.

<https://doi.org/10.1016/j.cognition.2011.03.003>

Copeland, M. A. (1925). Professor knight on psychology. *Quarterly Journal of Economics*, *40*(1), 134–151. <https://doi.org/10.2307/1885818>

Crone, E. A., Bullens, L., Van Der Plas, E. A. A., Kijkuit, E. J., & Zelazo, P. D. (2008).

Developmental changes and individual differences in risk and perspective taking in adolescence. *Development and Psychopathology*, *20*(4), 1213–1229.

<https://doi.org/10.1017/S0954579408000588>

Cruz-Neira, C., Sandin, D. J., DeFanti, T. A., Kenyon, R. V., & Hart, J. C. (1992). The CAVE: Audio Visual Experience Automatic Virtual Environment. *Communications of the ACM*, *35*(6), 64–72. <https://doi.org/10.1145/129888.129892>

De Agrò, M., Grimwade, D., Bach, R., & Czaczkes, T. J. (2021). Irrational risk aversion in an ant. *Animal Cognition*, *24*(6), 1237–1245. <https://doi.org/10.1007/s10071-021-01516-1>

De Petrillo, F., Paoletti, M., Bellagamba, F., Manzi, G., Paglieri, F., & Addessi, E. (2020).

Contextual factors modulate risk preferences in adult humans. *Behavioural Processes*, *176*, 104137. <https://doi.org/10.1016/j.beproc.2020.104137>

De Petrillo, F., & Rosati, A. G. (2019). Ecological rationality: Convergent decision-making in apes and capuchins. *Behavioural Processes*, *164*, pp. 201–213.

<https://doi.org/10.1016/j.beproc.2019.05.010>

- De Petrillo, F., & Rosati, A. G. (2021). Variation in primate decision-making under uncertainty and the roots of human economic behaviour. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 376(1819). <https://doi.org/10.1098/RSTB.2019.0671>
- De Petrillo, F., Ventricelli, M., Ponsi, G., & Addessi, E. (2015). Do tufted capuchin monkeys play the odds? Flexible risk preferences in *Sapajus* spp. *Animal Cognition*, 18(1), 119–130. <https://doi.org/10.1007/s10071-014-0783-7>
- Deb, S., Carruth, D. W., Sween, R., Strawderman, L., & Garrison, T. M. (2017). Efficacy of virtual reality in pedestrian safety research. *Applied Ergonomics*, 65, 449–460. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2017.03.007>
- Deckers, T., Falk, A., Kosse, F., & Schildberg-Hörisch, H. (2015, April). *How does socio-economic status shape a child's personality?* (Discussion Paper Series of SFB/TR 15 Governance and the Efficiency of Economic Systems No.498). <https://ideas.repec.org/p/trf/wpaper/498.html>
- Defoe, I. N. (2021). Towards a hybrid criminological and psychological model of risk behavior: The developmental neuro-ecological risk-taking model (DNERM). *Developmental Review*, 62, 100995. <https://doi.org/10.1016/J.DR.2021.100995>
- Defoe, I. N., Dubas, J. S., Figner, B., & Van Aken, M. A. G. (2015). A meta-analysis on age differences in risky decision making: Adolescents versus children and adults. *Psychological Bulletin*, 141(1), 48–84. <https://doi.org/10.1037/a0038088>

- Defoe, I. N., Semon Dubas, J., & Romer, D. (2019). Heightened Adolescent Risk-Taking? Insights From Lab Studies on Age Differences in Decision-Making. *Policy Insights from the Behavioral and Brain Sciences*, 6(1), 56–63. <https://doi.org/10.1177/2372732218801037>
- Demetre, J. D., Lee, D. N., Pitcairn, T. K., Grieve, R., Thomson, J. A., & Ampofo-Boateng, K. (1992). Errors in young children’s decisions about traffic gaps: Experiments with roadside simulations. *British Journal of Psychology*, 83(2), 189–202. <https://doi.org/10.1111/j.2044-8295.1992.tb02434.x>
- Denison, S., & Xu, F. (2010). Twelve- to 14-month-old infants can predict single-event probability with large set sizes. *Developmental Science*, 13(5), 798–803. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2009.00943.x>
- Denison, S., & Xu, F. (2014). The origins of probabilistic inference in human infants. *Cognition*, 130(3), 335–347. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2013.12.001>
- Dolins, F. L., Klimowicz, C., Kelley, J., & Menzel, C. R. (2014). Using virtual reality to investigate comparative spatial cognitive abilities in chimpanzees and humans. *American Journal of Primatology*, 76(5), 496–513. <https://doi.org/10.1002/ajp.22252>
- Dolins, F. L., Schweller, K., & Milne, S. (2017). Technology advancing the study of animal cognition: using virtual reality to present virtually simulated environments to investigate nonhuman primate spatial cognition. *Current Zoology*, 63(1), 97–108. <https://doi.org/10.1093/CZ/ZOW121>

- Dubois, M., Bowler, A., Moses-Payne, M.E., Habicht, J., Moran, R., Steinbeis, N., & Hauser, T.U. (2022). Exploration heuristics decrease during youth. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, 22(5), 969–983. <https://doi.org/10.3758/s13415-022-01009-9>
- Duckworth, A. L., & Steinberg, L. (2015). Unpacking *Self-control*. *Child Development Perspectives*, 9(1), 32–37. <https://doi.org/10.1111/cdep.12107>
- Dunbar, G., Hill, R., & Lewis, V. (2001). Children’s Attentional Skills and Road Behavior. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 7(3), 227–234. <https://doi.org/10.1037/1076-898X.7.3.227>
- Dużmańska, N., Strojny, P., & Strojny, A. (2018). Can Simulator Sickness Be Avoided? A Review on Temporal Aspects of Simulator Sickness. *Frontiers in psychology*, 9, 2132. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.02132>
- Eagly, A. H., & Wood, W. (1999). The origins of sex differences in human behavior: Evolved dispositions versus social roles. *American Psychologist*, 54(6), 408–423. <https://doi.org/10.1037/0003-066X.54.6.408>
- Eckel, C. C., Grossman, P. J., Johnson, C. A., de Oliveira, A. C. M., Rojas, C., & Wilson, R. K. (2012). School environment and risk preferences: Experimental evidence. *Journal of Risk and Uncertainty*, 45(3), 265–292. <https://doi.org/10.1007/s11166-012-9156-2>
- Eisenreich, B.R., Hayden, B.Y., & Zimmermann, J. (2019). Macaques are risk-averse in a freely moving foraging task. *Scientific Reports*, 9(1), 15091. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-51442-z>

- Ellsberg, D. (1961). Risk, ambiguity, and the savage axioms. *Quarterly Journal of Economics*, 75(4), 643–669. <https://doi.org/10.2307/1884324>
- Fantz, R. L. (1964). Visual experience in infants: Decreased attention to familiar patterns relative to novel ones. *Science*, 146(3644), 668–670. <https://doi.org/10.1126/science.146.3644.668>
- Farashahi, S., Azab, H., Hayden, B., & Soltani, A. (2018). On the Flexibility of Basic Risk Attitudes in Monkeys. *Journal of Neuroscience*, 38(18), 4383–4398. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.2260-17.2018>
- Ferretti, F., Chiera, A., Nicchiarelli, S., Adornetti, I., Magni, R., Vicari, S., Valeri, G., & Marini, A. (2018). The development of episodic future thinking in middle childhood. *Cognitive Processing*, 19(1), 87–94. <https://doi.org/10.1007/s10339-017-0842-5>
- Forss, S. I. F., Koski, S. E., & van Schaik, C. P. (2017). Explaining the Paradox of Neophobic Explorers: The Social Information Hypothesis. *International Journal of Primatology*, 38(5), 799–822. <https://doi.org/10.1007/s10764-017-9984-7>
- Frey, R., Pedroni, A., Mata, R., Rieskamp, J., & Hertwig, R. (2017). Risk preference shares the psychometric structure of major psychological traits. *Science Advances*, 3(10), e1701381. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1701381>
- Frossard, J., & Renaud, O. (2021). Permutation tests for regression, anova, and comparison of signals: The permuco package. *Journal of Statistical Software*, 99(15), 1-32. <https://doi.org/10.18637/JSS.V099.I15>

- Garcia, B., Cerrotti, F., & Palminteri, S. (2021). The description–experience gap: a challenge for the neuroeconomics of decision-making under uncertainty. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 376(1819). <https://doi.org/10.1098/RSTB.2019.0665>
- Gigerenzer, G. (2002). *Reckoning with risk : learning to live with uncertainty*. London: Allen Lane. <https://lib.ugent.be/catalog/rug01:002167398>
- Gigerenzer, G., & Goldstein, D. G. (1996). Reasoning the fast and frugal way: models of bounded rationality. *Psychological Review*, 103(4), 650–669. <https://doi.org/10.1037/0033-295x.103.4.650>
- Gigerenzer, G., & Todd, P. M. (2012). *Ecological Rationality: The Normative Study of Heuristics*. In *Ecological Rationality : Intelligence in the World* (pp. 488–498). Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/ACPROF:OSO/9780195315448.003.0142>
- Gigerenzer, G., Todd, P. M., & ABC Research Group. (1999). *Simple heuristics that make us smart*. Oxford University Press.
- Gilbert, D. T., & Wilson, T. D. (2007). Propection: Experiencing the future. *Science*, 317(5843), 1351–1354. <https://doi.org/10.1126/SCIENCE.1144161>
- Glimcher, P. W., & Fehr, E. (2014). *Neuroeconomics: Decision Making and the Brain*. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/C2011-0-05512-6>
- Goldstein, D. G., & Gigerenzer, G. (2002). Models of ecological rationality: The recognition heuristic. *Psychological Review*, 109(1), 75–90. <https://doi.org/10.1037/0033-295x.109.1.75>

- Golman, R., & Loewenstein, G. (2018). Information gaps: A theory of preferences regarding the presence and absence of information. *Decision*, 5(3), 143–164.
<https://doi.org/10.1037/dec0000068>
- Gopnik, A. (2020). Childhood as a solution to explore-exploit tensions. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 375(1803), 20190502.
<https://doi.org/10.1098/rstb.2019.0502>
- Gopnik, A., O’Grady, S., Lucas, C. G., Griffiths, T. L., Wente, A., Bridgers, S., Aboody, R., Fung, H., & Dahl, R. E. (2017). Changes in cognitive flexibility and hypothesis search across human life history from childhood to adolescence to adulthood. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(30), 7892–7899. <https://doi.org/10.1073/pnas.1700811114>
- Gott, C., & Lah, S. (2014). Episodic future thinking in children compared to adolescents. *Child Neuropsychology*, 20(5), 625–640. <https://doi.org/10.1080/09297049.2013.840362>
- Gottlieb, J., Oudeyer, P. Y., Lopes, M., & Baranes, A. (2013). Information-seeking, curiosity, and attention: computational and neural mechanisms. *Trends in Cognitive Sciences*, 17(11), 585–593. <https://doi.org/10.1016/J.TICS.2013.09.001>
- Gould, S. J., & Vrba, E. S. (1982). Exaptation—a Missing Term in the Science of Form. *Paleobiology*, 8(1), 4–15. <https://doi.org/10.1017/S0094837300004310>
- Gračanin, A., Bylsma, L. M., & Vingerhoets, A. J. J. M. (2018). Why Only Humans Shed Emotional Tears: Evolutionary and Cultural Perspectives. *Human Nature*, 29(2), 104–133.
<https://doi.org/10.1007/s12110-018-9312-8>

- Habib, M., & Cassotti, M. (2015). Le temps des regrets : comment le développement du regret influence-t-il la prise de décision à risque des enfants et des adolescents ? *L'Année Psychologique*, 115(4), 637–664. <https://doi.org/10.3917/anpsy.154.0637>
- Hanson, L. K., Atance, C. M., & Paluck, S. W. (2014). Is thinking about the future related to theory of mind and executive function? Not in preschoolers. *Journal of Experimental Child Psychology*, 128, 120–137. <https://doi.org/10.1016/J.JECP.2014.07.006>
- Harbaugh, W., Krause, K., & Vesterlund, L. (2002). Risk Attitudes of Children and Adults: Choices Over Small and Large Probability Gains and Losses. *Experimental Economics*, 5(1), 53–84. <https://doi.org/10.1023/A:1016316725855>
- Haun, D.B., Nawroth, C., & Call, J. (2011). Great apes' risk-taking strategies in a decision making task. *PLoS ONE*, 6(12), e28801. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0028801>
- Haux, L. M., Engelmann, J. M., Arslan, R. C., Hertwig, R., & Herrmann, E. (2023). Chimpanzee and Human Risk Preferences Show Key Similarities. *Psychological Science*, 34(3), 358-369. <https://doi.org/10.1177/09567976221140326>
- Hayden, B. Y., Heilbronner, S. R., Nair, A. C., & Platt, M. L. (2008). Cognitive influences on risk-seeking by rhesus macaques. *Judgment and Decision Making*, 3(5), 389. <https://doi.org/10.1017/S1930297500000401>
- Hayden, B.Y., & Walton, M.E. (2014). Neuroscience of foraging. *Frontiers in Neuroscience*, 8, 1-3. <https://doi.org/10.3389/fnins.2014.00081>

- Heilbronner, S. R. (2017). Modeling risky decision-making in nonhuman animals: shared core features. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, *16*, 23–29.
<https://doi.org/10.1016/j.cobeha.2017.03.001>
- Heilbronner, S. R., & Hayden, B. Y. (2013). Contextual factors explain risk-seeking preferences in rhesus monkeys. *Frontiers in Neuroscience*, *7*, 1–7.
<https://doi.org/10.3389/fnins.2013.00007>
- Heilbronner, S.R., & Hayden, B.Y. (2016). The description-experience gap in risky choice in nonhuman primates. *Psychonomic Bulletin & Review*, *23*, 593-600.
<https://doi.org/10.3758/s13423-015-0924-2>
- Heilbronner, S.R., Rosati, A.G., Stevens, J.R., Hare, B., & Hauser, M.D. (2008). A fruit in the hand or two in the bush? Divergent risk preferences in chimpanzees and bonobos. *Biology Letters*, *4*(3), 246-249. <https://doi.org/10.1098/rsbl.2008.0081>
- Hertwig, R., Barron, G., Weber, E.U., & Erev, I. (2004). Decisions from experience and the effect of rare events in risky choice. *Psychological Science*, *15*(8), 534–539.
<https://doi.org/10.1111/j.0956-7976.2004.00715.x>
- Heuberger, B., Paukner, A., Wooddell, L. J., Kasman, M., & Hammond, R. A. (2020). The role of novelty and fat and sugar concentration in food selection by captive tufted capuchins (*Sapajus apella*). *American Journal of Primatology*, *82*(8), e23165.
<https://doi.org/10.1002/AJP.23165>
- Hills, T. T., Jones, M. N., & Todd, P. M. (2012). Optimal foraging in semantic memory. *Psychological Review*, *119*(2), 431–440. <https://doi.org/10.1037/A0027373>

- Hills, T. T., Todd, P. M., & Goldstone, R. L. (2008). Search in external and internal spaces: Evidence for generalized cognitive search processes. *Psychological Science, 19*(8), 802–808. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9280.2008.02160.x>
- Hills, T. T., Todd, P. M., Lazer, D., Redish, A. D., Couzin, I. D., Bateson, M., Cools, R., Dukas, R., Giraldeau, L. A., Macy, M. W., Page, S. E., Shiffrin, R. M., Stephens, D. W., & Wolfe, J. W. (2015). Exploration versus exploitation in space, mind, and society. *Trends in Cognitive Sciences, 19*(1), 46–54. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2014.10.004>
- Hoffrage, U., Weber, A., Hertwig, R., & Chase, V. M. (2003). How to keep children safe in traffic: find the daredevils early. *Journal of experimental psychology : Applied, 9*(4), 249–260. <https://doi.org/10.1037/1076-898X.9.4.249>
- Houston, A. I., Fawcett, T. W., Mallpress, D. E. W., & McNamara, J. M. (2014). Clarifying the relationship between prospect theory and risk-sensitive foraging theory. *Evolution and Human Behavior, 35*(6), 502–507. <https://doi.org/10.1016/J.EVOLHUMBEHAV.2014.06.010>
- Huber, B. L., & Huber, O. (1987). Development of the concept of comparative subjective probability. *Journal of Experimental Child Psychology, 44*(3), 304–316. [https://doi.org/10.1016/0022-0965\(87\)90036-1](https://doi.org/10.1016/0022-0965(87)90036-1)
- Hudson, J. A., Shapiro, L. R., & Sosa, B. B. (1995). Planning in the Real World: Preschool Children's Scripts and Plans for Familiar Events. *Child Development, 66*(4), 984–998. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8624.1995.tb00917.x>

- Jiang, Y., O'neal, E. E., Yon, P., Franzen, L., Rahimian, P., Plumert, J. M., & Kearney, J. K. (2018). Acting Together: Joint Pedestrian Road Crossing in an Immersive Virtual Environment. *CM Transactions on Applied Perception (TAP)*, 15(2), 1-13.
<https://doi.org/10.1145/3147884>
- Kabadayi, C., & Osvath, M. (2017). Ravens parallel great apes in flexible planning for tool-use and bartering. *Science*, 357(6347), 202–204. <https://doi.org/10.1126/science.aam8138>
- Kacelnik, A., & Bateson, M. (1996). Risky Theories—The Effects of Variance on Foraging Decisions. *American Zoologist*, 36(4), 402–434. <https://doi.org/10.1093/icb/36.4.402>
- Kacelnik, A., & Bateson, M. (1997). Risk-sensitivity: crossroads for theories of decision-making. *Trends in Cognitive Sciences*, 1(8), 304–309. [https://doi.org/10.1016/S1364-6613\(97\)01093-0](https://doi.org/10.1016/S1364-6613(97)01093-0)
- Kacelnik, A., & El Mouden, C. (2013). Triumphs and trials of the risk paradigm. *Animal Behaviour*, 86(6), 1117–1129. <https://doi.org/10.1016/j.anbehav.2013.09.034>
- Kahneman, D., Slovic, P., & Tversky, A. (Eds.). (1982). *Judgment under Uncertainty : Heuristics and Biases* . Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511809477>
- Kahneman, D., & Tversky, A. (1979). Prospect Theory: An Analysis of Decision under Risk. *Econometrica*, 47(2), 263–291. <https://doi.org/10.2307/1914185>
- Kalenscher, T., & van Wingerden, M. (2011). Why we should use animals to study economic decision making – a perspective. *Frontiers in Neuroscience*, 5, 82.
<https://doi.org/10.3389/fnins.2011.00082>

Kennedy, R., Lane, N., Berbaum, K., & Lilienthal, M. (1993). Simulator Sickness Questionnaire: An Enhanced Method for Quantifying Simulator Sickness. *The International Journal of Aviation Psychology*, 3(3), 203-220. https://doi.org/10.1207/s15327108ijap0303_3

Keynes, J. M. (1921). *A treatise on probability*. Macmillan and Co.

Khachatryan, K., Dreber, A., von Essen, E., & Ranehill, E. (2015). Gender and preferences at a young age: Evidence from Armenia. *Journal of Economic Behavior and Organization*, 118, 318–332. <https://doi.org/10.1016/j.jebo.2015.02.021>

Kidd, C., & Hayden, B. Y. (2015). The Psychology and Neuroscience of Curiosity. *Neuron*, 88(3), 449–460. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2015.09.010>

Kidd, C., Piantadosi, S. T., & Aslin, R. N. (2012). The Goldilocks effect: Human infants allocate attention to visual sequences that are neither too simple nor too complex. *PLoS ONE*, 7(5). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0036399>

Knight, F. H. (1921). *Risk, Uncertainty and Profit* (1st ed.). Houghton Mifflin.

Knight, F. H. (1925a). Fact and Metaphysics in Economic Psychology. *The American Economic Review*, 15(2), 247–266. <https://www.jstor.org/stable/1807116>

Knight, F. H. (1925b). Economic Psychology and the Value Problem. *The Quarterly Journal of Economics*, 39(3), 372-409. <https://doi.org/10.2307/1882434>

Kobayashi, K., & Hsu, M. (2019). Common neural code for reward and information value. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(26), 13061-13066. <https://doi.org/10.1073/pnas.1820145116>

Krupenye, C., Kano, F., Hirata, S., Call, J., & Tomasello, M. (2016). Great apes anticipate that other individuals will act according to false beliefs. *Science*, 354(6308), 110–114.

<https://doi.org/10.1126/science.aaf8110>

Krupenye, C., Rosati, A. G., & Hare, B. (2015). Bonobos and chimpanzees exhibit human-like framing effects. *Biology Letters*, 11(2), 20140527 .

<https://doi.org/10.1098/RSBL.2014.0527>

Lacombe, P., Brocard, S., Zuberbühler, K., & Dahl, C. D. (2022). Rationality and cognitive bias in captive gorillas' and orang-utans' economic decision-making. *PLoS ONE*, 17(12),

e0278150. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0278150>

Lakshminarayanan, V. R., Chen, M. K., & Santos, L. R. (2011). The evolution of decision-making under risk: Framing effects in monkey risk preferences. *Journal of Experimental Social Psychology*, 47(3), 689–693. <https://doi.org/10.1016/j.jesp.2010.12.011>

Lang, A., & Betsch, T. (2018). Children's neglect of probabilities in decision making with and without feedback. *Frontiers in Psychology*, 9, 191.

<https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.00191>

Lapidow, E., Killeen, I., & Walker, C. M. (2022). Learning to recognize uncertainty vs. recognizing uncertainty to learn: Confidence judgments and exploration decisions in preschoolers.

Developmental Science, 25(2), e13178. <https://doi.org/10.1111/desc.13178>

Lapidow, E., & Walker, C. M. (2020). Informative experimentation in intuitive science: Children select and learn from their own causal interventions. *Cognition*, 201, 104315.

<https://doi.org/10.1016/j.cognition.2020.104315>

- Lee, D. N., Young, D. S., & McLaughlin, C. M. (1984). A roadside simulation of road crossing for children. *Ergonomics*, 27(12), 1271–1281. <https://doi.org/10.1080/00140138408963608>
- Lejuez, C. W., Read, J. P., Kahler, C. W., Richards, J. B., Ramsey, S. E., Stuart, G. L., Strong, D. R., & Brown, R. A. (2002). Evaluation of a behavioral measure of risk taking: The Balloon Analogue Risk Task (BART). *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 8(2), 75–84. <https://doi.org/10.1037//1076-898X.8.2.75>
- Levin, I. P., & Hart, S. S. (2003). Risk Preferences in Young Children: Early Evidence of Individual Differences in Reaction to Potential Gains and Losses. *Journal of Behavioral Decision Making*, 16(5), 397–413. <https://doi.org/10.1002/bdm.453>
- Levin, I. P., Hart, S. S., Weller, J. A., & Harshman, L. A. (2007). Stability of choices in a risky decision-making task: a 3-year longitudinal study with children and adults. *Journal of Behavioral Decision Making*, 20(3), 241–252. <https://doi.org/10.1002/BDM.552>
- Levin, I. P., Weller, J. A., Pederson, A. A., & Harshman, L. A. (2007). Age-related differences in adaptive decision making: Sensitivity to expected value in risky choice. *Judgment and Decision Making*, 2(4), 225–233. <https://doi.org/10.1017/S1930297500000553>
- Li, R. (2023). Children are adaptive decision-makers: how environment shapes decision preferences. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 290(1995), 20222117. <https://doi.org/10.1098/rspb.2022.2117>
- Liquin, E. G., & Gopnik, A. (2022). Children are more exploratory and learn more than adults in an approach-avoid task. *Cognition*, 218, 104940. <https://doi.org/10.1016/J.COGNITION.2021.104940>

- Liquin, E. G., & Lombrozo, T. (2020). Explanation-seeking curiosity in childhood. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, 35, 14–20. <https://doi.org/10.1016/j.cobeha.2020.05.012>
- Litman, J. A. (2007). Curiosity as a feeling of interest and feeling of deprivation: the I/D model of curiosity. In P. R. Zelick (Ed.), *Issue in the Psychology of Motivation* (pp. 147–154). Nova Science Publishers, Inc. <http://drjlitman.net/wp-content/uploads/2013/11/Litman-2007-invited-chapter.pdf>
- Litman, J. A. (2008). Interest and deprivation factors of epistemic curiosity. *Personality and Individual Differences*, 44(7), 1585–1595. <https://doi.org/10.1016/j.paid.2008.01.014>
- Loewenstein, G. (1994). The psychology of curiosity: A review and reinterpretation. *Psychological Bulletin*, 116(1), 75–98. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.116.1.75>
- Lombardi, E., Di Dio, C., Castelli, I., Massaro, D., & Marchetti, A. (2017). Prospective thinking and decision making in primary school age children. *Heliyon*, 3(6), e00323. <https://doi.org/10.1016/J.HELIYON.2017.E00323>
- Long, A.B., Kuhn, C.M., & Platt, M.L. (2009). Serotonin shapes risky decision making in monkeys. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, 4(4), 346-356. <https://doi.org/10.1093/scan/nsp020>
- Ludvig, E.A., Madan, C.R., Pisklak, J.M., & Spetch, M.L. (2014). Reward context determines risky choice in pigeons and humans. *Biology Letters*, 10(8), 20140451. <https://doi.org/10.1098/rsbl.2014.0451>
- MacLean, E. L., Matthews, L. J., Hare, B. A., Nunn, C. L., Anderson, R. C., Aureli, F., Brannon, E. M., Call, J., Drea, C. M., Emery, N. J., Haun, D. B. M., Herrmann, E., Jacobs, L. F., Platt, M.

- L., Rosati, A. G., Sandel, A. A., Schroepfer, K. K., Seed, A. M., Tan, J., ... Wobber, V. (2012). How does cognition evolve? Phylogenetic comparative psychology. *Animal Cognition*, 15(2), 223–238. <https://doi.org/10.1007/s10071-011-0448-8>
- MacLean, E. L., Mandalaywala, T. M., & Brannon, E. M. (2012). Variance-sensitive choice in lemurs: Constancy trumps quantity. *Animal Cognition*, 15(1), 15–25. <https://doi.org/10.1007/s10071-011-0425-2>
- Magne, L. (2010, Mars). Histoire sémantique du risque et de ses corrélats. Communication présentée aux Journées d'histoire de la comptabilité et du management, Paris, France. <https://basepub.dauphine.psl.eu/handle/123456789/4438>
- ManyPrimates, Aguenounon, G. S., Ballesta, S., Beaud, A., Bustamante, L., Canteloup, C., Joly, M., Loyant, L., Meunier, H., Roig, A., Troisi, C. A., & Zablocki-Thomas, P. (2020). ManyPrimates : une infrastructure de collaboration internationale dans la recherche en cognition des primates. *Revue de Primatologie*, 11. <https://doi.org/10.4000/primatologie.8808>
- ManyPrimates, Altschul, D. M., Beran, M. J., Bohn, M., Call, J., DeTroy, S., Duguid, S. J., Egelkamp, C. L., Fichtel, C., Fischer, J., Flessert, M., Hanus, D., Haun, D. B. M., Haux, L. M., Hernandez-Aguilar, R. A., Herrmann, E., Hopper, L. M., Joly, M., Kano, F., ... Watzek, J. (2019). Establishing an infrastructure for collaboration in primate cognition research. *PLoS ONE*, 14(10), e0223675. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0225236>
- ManyPrimates, Altschul, D., Beran, M. J., Bohn, M., Caspar, K., Fichtel, C., Försterling, M., Grebe, N., Hernandez-Aguilar, R. A., Kwok, S. C., Rodrigo, A. M., Proctor, D., Sanchez-Amaro, A.,

- Simpson, E., Szabelska, A., Taylor, D., Mescht, J. van der, Völter, C., & Watzek, J. (2020). Collaborative open science as a way to reproducibility and new insights in primate cognition research. *Japanese Psychological Review*, 62(3), 205–220.
https://doi.org/10.24602/sjpr.62.3_205
- Mata, R., Frey, R., Richter, D., Schupp, J., & Hertwig, R. (2018). Risk Preference: A View from Psychology. *The journal of economic perspectives*, 32(2), 155–172.
<https://doi.org/10.1257/jep.32.2.155>
- Mata, R., Josef, A. K., Samanez-Larkin, G. R., & Hertwig, R. (2011). Age differences in risky choice: a meta-analysis. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1235(1), 18–29.
<https://doi.org/10.1111/J.1749-6632.2011.06200.X>
- Mather, E. (2013). Novelty, attention, and challenges for developmental psychology. *Frontiers in Psychology*, 4, 491. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2013.00491>
- Matthews, J. R., Cooper, P. S., Bode, S., & Chong, T. T. J. (2023). The availability of non-instrumental information increases risky decision-making. *Psychonomic Bulletin and Review*, 1–13. <https://doi.org/10.3758/s13423-023-02279-1>
- McComas, J., MacKay, M., & Pivik, J. (2002). Effectiveness of virtual reality for teaching pedestrian safety. *Cyberpsychology and Behavior*, 5(3), 185–190.
<https://doi.org/10.1089/109493102760147150>
- McCoy, A.N., & Platt, M.L. (2005). Risk-sensitive neurons in macaque posterior cingulate cortex. *Nature Neurosciences*, 8(9), 1220–1227. <https://doi.org/10.1038/nn1523>

Meder, B., Wu, C. M., Schulz, E., & Ruggeri, A. (2021). Development of directed and random exploration in children. *Developmental Science*, 24(4), e13095.

<https://doi.org/10.1111/DESC.13095>

Mehlhorn, K., Newell, B.R., Todd, P.M., Lee, M.D., Morgan, K., Braithwaite, V.A., Hausmann, D., Fiedler, K., & Gonzalez, C. (2015). Unpacking the exploration-exploitation tradeoff: A synthesis of human and animal literatures. *Decision*, 2(3), 191–215.

<https://doi.org/10.1037/dec0000033>

Meir, A., Oron-Gilad, T., & Parmet, Y. (2015). Are child-pedestrians able to identify hazardous traffic situations? Measuring their abilities in a virtual reality environment. *Safety Science*, 80, 33–40. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2015.07.007>

Meir, A., Parmet, Y., & Oron-Gilad, T. (2013). Towards understanding child-pedestrians' hazard perception abilities in a mixed reality dynamic environment. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 20, 90–107.

<https://doi.org/10.1016/j.trf.2013.05.004>

Mishra, S. (2014). Decision-Making Under Risk: Integrating Perspectives From Biology, Economics, and Psychology. *Personality and Social Psychology Review*, 18(3), 280–307.

<https://doi.org/10.1177/1088868314530517>

Mishra, S., Gregson, M., & Lalumière, M. L. (2012). Framing effects and risk-sensitive decision making. *British Journal of Psychology*, 103(1), 83–97. [https://doi.org/10.1111/J.2044-](https://doi.org/10.1111/J.2044-8295.2011.02047.X)

[8295.2011.02047.X](https://doi.org/10.1111/J.2044-8295.2011.02047.X)

- Mongin, P. (2014). Le paradoxe d'Allais. Comment lui rendre sa signification perdue ? *Revue Économique*, 65(5), 743–779. <https://doi.org/10.3917/reco.655.0743>
- Moran, N. P., Sánchez-Tójar, A., Schielzeth, H., & Reinhold, K. (2021). Poor nutritional condition promotes high-risk behaviours: a systematic review and meta-analysis. *Biological Reviews*, 96(1), 269–288. <https://doi.org/10.1111/BRV.12655>
- Morrongiello, B. A., Corbett, M., Koutsoulianos, S., & Foster, A. (2019). Effects of Peers on Child Pedestrian Behaviors in a Virtual Traffic Context. *Journal of Pediatric Psychology*, 44(4), 509–516. <https://doi.org/10.1093/JPEPSY/JSY103>
- Morrongiello, B. A., Corbett, M., Milanovic, M., & Beer, J. (2016). Using a Virtual Environment to Examine How Children Cross Streets: Advancing Our Understanding of How Injury Risk Arises. *Journal of Pediatric Psychology*, 41(2), 265–275. <https://doi.org/10.1093/jpepsy/jsv078>
- Morrongiello, B. A., Corbett, M., Milanovic, M., Pyne, S., & Vierich, R. (2015). Innovations in using virtual reality to study how children cross streets in traffic: Evidence for evasive action skills. *Injury Prevention*, 21(4), 266–270. <https://doi.org/10.1136/injuryprev-2014-041357>
- Morrongiello, B. A., Kane, A., McArthur, B. A., & Bell, M. (2012). Physical risk taking in elementary-school children: Measurement and emotion regulation issues. *Personality and Individual Differences*, 52(4), 492–496. <https://doi.org/10.1016/j.paid.2011.11.003>
- Morrongiello, B.A., Lasenby-Lessard, J., & Corbett, M. (2009). Children's risk taking in a gambling task and injury-risk situation: Evidence for domain specificity in risk decisions.

Personality and Individual Differences, 46(3), 298–302.

<https://doi.org/10.1016/j.paid.2008.10.018>

Munro, A., & Tanaka, Y. (2014). *Risky rotten kids: an experiment on risk attitudes amongst adolescents in rural Uganda* (GRIPS Discussion Papers No. 14-01). National Graduate Institute for Policy Studies.

Nelson, E. L., Alvarez, J., Jimenez, B., & Padron, K. (2022). State of the Field : Developmental Primate Cognition. In *Primate Cognitive Studies* (pp. 88–114). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781108955836.005>

Nesse, R. M. (2013). Tinbergen’s four questions, organized: A response to Bateson and Laland. *Trends in Ecology and Evolution*, 28(12), 681–682.

<https://doi.org/10.1016/j.tree.2013.10.008>

Newcombe, N. S., Balcomb, F., Ferrara, K., Hansen, M., & Koski, J. (2014). Two rooms, two representations? Episodic-like memory in toddlers and preschoolers. *Developmental Science*, 17(5), 743–756. <https://doi.org/10.1111/DESC.12162>

Nioche, A., Bourgeois-Gironde, S., & Boraud, T. (2019). An asymmetry of treatment between lotteries involving gains and losses in rhesus monkeys. *Scientific Reports*, 9(1), 10441.

<https://doi.org/10.1038/s41598-019-46975-2>

Nioche, A., Rougier, N. P., Deffains, M., Bourgeois-Gironde, S., Ballesta, S., & Boraud, T. (2021). The adaptive value of probability distortion and risk-seeking in macaques’ decision-making. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 376(1819), 20190668.

<https://doi.org/10.1098/RSTB.2019.0668>

Nussenbaum, K., Martin, R. E., Maulhardt, S., Yang, Y., Bizzell-Hatcher, G., Bhatt, N. S., ...

Hartley, C. A. (2022). *Novelty and uncertainty differentially drive exploration across development*. PsyArXiv. <https://doi.org/10.31234/OSF.IO/PKN7J>

O'Neill, M., & Schultz, W. (2010). Coding of reward risk by orbitofrontal neurons is mostly distinct from coding of reward value. *Neuron*, 68(4), 789-800.

<https://doi.org/10.1016/j.neuron.2010.09.031>

Osvath, M. (2009). Spontaneous planning for future stone throwing by a male chimpanzee.

Current Biology, 19(5), R190–R191). <https://doi.org/10.1016/j.cub.2009.01.010>

Osvath, M., & Martin-Ordas, G. (2014). The future of future-oriented cognition in non-humans:

Theory and the empirical case of the great apes. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 369(1655), 20130468. <https://doi.org/10.1098/rstb.2013.0486>

Palminteri, S., & Chevallier, C. (2018). Can we infer inter-individual differences in risk-taking from behavioral tasks? *Frontiers in Psychology*, 9, 2307.

<https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.02307>

Paulsen, D. J., Carter, R. M. K., Platt, M. L., Huettel, S. A., & Brannon, E. M. (2012).

Neurocognitive development of risk aversion from early childhood to adulthood.

Frontiers in Human Neuroscience, 5, 1–17. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2011.00178>

Paulsen, D. J., Platt, M. L., Huettel, S. A., & Brannon, E. M. (2011). Decision-making under risk in children, adolescents, and young adults. *Frontiers in Psychology*, 2, 72.

<https://doi.org/10.3389/fpsyg.2011.00072>

- Paulsen, D. J., Platt, M. L., Scott, A. H., & Brannon, E. M. (2012). From risk-seeking to risk-averse: The development of economic risk preference from childhood to adulthood. *Frontiers in Psychology, 3*, 313. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2012.00313>
- Pawlowski, B., Atwal, R., & Dunbar, R. I. M. (2008). Sex Differences in Everyday Risk-Taking Behavior in Humans. *Evolutionary Psychology, 6*(1), 147470490800600104. <https://doi.org/10.1177/147470490800600104>
- Pelé, M., Broihanne, M. H., Thierry, B., Call, J., & Dufour, V. (2014). To bet or not to bet? Decision-making under risk in non-human primates. *Journal of Risk and Uncertainty, 49*(2), 141–166. <https://doi.org/10.1007/s11166-014-9202-3>
- Perelman, P., Johnson, W. E., Roos, C., Seuáñez, H. N., Horvath, J. E., Moreira, M. A. M., Kessing, B., Pontius, J., Roelke, M., Rumpler, Y., Schneider, M. P. C., Silva, A., O'Brien, S. J., & Pecon-Slattery, J. (2011). A Molecular Phylogeny of Living Primates. *PLoS Genetics, 7*(3), e1001342. <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PGEN.1001342>
- Peterson, E. J., & Verstynen, T. D. (2022). *Embracing curiosity eliminates the exploration-exploitation dilemma*. BioRxiv. <https://doi.org/10.1101/671362>
- Peterson, M. (2019). The St. Petersburg Paradox. In E. N. Zalta (Ed.), *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Fall 2019 Edition). <https://plato.stanford.edu/archives/fall2019/entries/paradox-stpetersburg/>
- Piaget, J. (1952). *The origins of intelligence in children*. International University Press.
- Piaget, J., & Inhelder, B. (1951). *La genèse de l'idée de hasard chez l'enfant*. Presses Universitaires de France.

- Piron, S. (2004). L'apparition du resicum en Méditerranée occidentale, XIIe-XIIIe siècles. In E. Collas-Heddeland, M. Coudry, O. Kammerer, A. J. Lemaître, & B. Martin (Eds.), *Pour une histoire culturelle du risque: Genèse, évolution, actualité du concept dans les sociétés occidentales* (pp. 59–76). Editions Histoire et Anthropologie.
- Pitcairn, T. K., & Edlmann, T. (2000). Individual differences in road crossing ability in young children and adults. *British Journal of Psychology*, *91*(3), 391–410.
<https://doi.org/10.1348/000712600161899>
- Pless, I. B., Taylor, H. G., & Arsenault, L. (1995). The Relationship Between Vigilance Deficits and Traffic Injuries Involving Children. *Pediatrics*, *95*(2), 219-224.
<https://doi.org/10.1542/peds.95.2.219>
- Plumert, J. M., Kearney, J. K., & Cremer, J. F. (2004). Children's perception of gap affordances: Bicycling across traffic-filled intersections in an immersive virtual environment. *Child Development*, *75*(4), 1243-1253. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8624.2004.00736.x>
- Plumert, J. M., Kearney, J. K., Cremer, J. F., Recker, K. M., & Strutt, J. (2011). Changes in children's perception-action tuning over short time scales: Bicycling across traffic-filled intersections in a virtual environment. *Journal of Experimental Child Psychology*, *108*(2), 322–337. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2010.07.005>
- Pradier, P.-C. (2006). *La notion de risque en économie*. La Découverte.
<https://doi.org/10.3917/dec.pradi.2006.01>
- Proctor, D., Williamson, R.A., Latzman, R.D., de Waal, F.B.M., & Brosnan, S.F. (2014). Gambling primates: Reactions to a modified Iowa Gambling Task in humans, chimpanzees and

capuchin monkeys. *Animal Cognition*, 17, 983–995. <https://doi.org/10.1007/s10071-014-0730-7>

R Core Team (2022). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org>

Rahimian, P., O’Neal, E. E., Zhou, S., Plumert, J. M., & Kearney, J. K. (2018). Harnessing Vehicle-to-Pedestrian (V2P) Communication Technology: Sending Traffic Warnings to Texting Pedestrians. *Human Factors*, 60(6), 833–843. <https://doi.org/10.1177/0018720818781365>

Rakoczy, H., & Haun, D. (2020). Comparative cognition between children and animals. In S. Hupp & J. D. Jewell (Eds.), *The Encyclopedia of Child and Adolescent Development*. John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9781119171492.WECAD109>

Rakow, T., & Rahim, S. B. (2010). Developmental insights into experience-based decision making. *Journal of Behavioral Decision Making*, 23(1), 69–82. <https://doi.org/10.1002/BDM.672>

Real, L. (1980). Fitness, Uncertainty, and the Role of Diversification in Evolution and Behavior. *The American Naturalist*, 115(5), 623–638. <https://doi.org/10.1086/283588>

Real, L., Ott, J., & Silverfine, E. (1982). On the tradeoff between the mean and the variance in foraging: effect of spatial distribution and color preference. *Ecology*, 63(6), 1617–1623. <https://doi.org/10.2307/1940101>

Real, L., & Caraco, T. (1986). Risk and foraging in stochastic environments. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 17(1), 371–390.

<https://doi.org/10.1146/annurev.es.17.110186.002103>

Redshaw, J., & Ganea, P. A. (2022). Thinking about possibilities: mechanisms, ontogeny, functions and phylogeny. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 377(1866), 20210333. <https://doi.org/10.1098/RSTB.2021.0333>

Redshaw, J., & Suddendorf, T. (2016). Children’s and Apes’ Preparatory Responses to Two Mutually Exclusive Possibilities. *Current Biology*, 26(13), 1758–1762.

<https://doi.org/10.1016/J.CUB.2016.04.062>

Rivière, J., Kurt, A., & Meunier, H. (2019). Choice under risk of gain in tufted capuchin monkeys (*Sapajus apella*): A comparison with young children (*Homo sapiens*) and mangabey monkeys (*Cercocebus torquatus torquatus*). *Journal of Neuroscience, Psychology, and Economics*, 12(3–4), 159–168. <https://doi.org/10.1037/npe0000109>

Rivière, J., Stomp, M., Augustin, E., Lemasson, A., & Blois-Heulin, C. (2018). Decision-making under risk of gain in young children and mangabey monkeys. *Developmental Psychobiology*, 60(2), 176–186. <https://doi.org/10.1002/dev.21592>

Robson, A. J. (1996). A biological basis for expected and non-expected utility. *Journal of Economic Theory*, 68(2), 397–424. <https://doi.org/10.1006/JETH.1996.0023>

Roig, A., Meunier, H., Poulingue, E., Marty, A., Thouvarecq, R., & Rivière, J. (2022). Is economic risk proneness in young children (*Homo sapiens*) driven by exploratory behavior? A

- comparison with capuchin monkeys (*Sapajus apella*). *Journal of Comparative Psychology*, 136(2), 140–150. <https://doi.org/10.1037/COM0000314>
- Rolison, J. J., Pachur, T., McCormack, T., & Feeney, A. (2022). Developmental differences in description-based versus experience-based decision making under risk in children. *Journal of Experimental Child Psychology*, 219, 105401. <https://doi.org/10.1016/J.JECP.2022.105401>
- Rosati, A., & Hare, B. (2012). Decision making across social contexts: competition increases preferences for risk in chimpanzees and bonobos. *Animal Behaviour*, 84(4), 869-879. <https://doi.org/10.1016/j.anbehav.2012.07.010>
- Rosati, A., & Hare, B. (2013). Chimpanzees and bonobos exhibit emotional responses to decision outcomes. *PLoS ONE*, 8(5), e63058. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0063058>
- Rosati, A., & Hare, B. (2016). Reward currency modulates human risk preferences. *Evolution and Human Behavior*, 37(2), 159-168. <https://doi.org/10.1016/j.evolhumbehav.2015.10.003>
- Rosati, A. G., Thompson, M. E., Atencia, R., & Buckholtz, J. W. (2023). Distinct developmental trajectories for risky and impulsive decision-making in chimpanzees. *Journal of Experimental Psychology: General*, 152(6), 1551-1564. <https://doi.org/10.1037/XGE0001347>

Rosenbaum, G. M., & Hartley, C. A. (2019). Developmental perspectives on risky and impulsive choice. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 374(1766), 20180133.

<https://doi.org/10.1098/rstb.2018.0133>

Rosenbaum, G. M., Venkatraman, V., Steinberg, L., & Chein, J. M. (2018). The influences of described and experienced information on adolescent risky decision making.

Developmental Review, 47, 23-43. <https://doi.org/10.1016/J.DR.2017.09.003>

Rosenbaum, G. M., Venkatraman, V., Steinberg, L., & Chein, J. M. (2021). Do adolescents always take more risks than adults? A within-subjects developmental study of context effects on decision making and processing. *PLoS ONE*, 16(8), e0255102.

<https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0255102>

Rothengatter, T. (1984a). A behavioural approach to improving traffic behaviour of young children. *Ergonomics*, 27(2), 147–160. <https://doi.org/10.1080/00140138408963473>

Rothengatter, T. (1984b). The role of media in road safety education for young children. *British Journal of Developmental Psychology*, 2(2), 157–165. <https://doi.org/10.1111/j.2044-835x.1984.tb00779.x>

Ruggeri, K., Alí, S., Berge, M.L., Bertoldo, G., Bjørndal, L.D., Cortijos-Bernabeu, A., Davison, C., Demić, E., Esteban-Serna, C., Friedemann, M., Gibson, S. P., Jarke, H., Karakasheva, R., Khorrami, P.R., Kveder, J., Andersen, T.L., Lofthus, I.S., McGill, L., Nieto, A.E., ... Folke, T. (2020). Replicating patterns of prospect theory for decision under risk. *Nature Human Behaviour*, 4(6), 622–633. <https://doi.org/10.1038/s41562-020-0886-x>

- Ruggeri, A., Lombrozo, T., Griffiths, T. L., & Xu, F. (2016). Sources of developmental change in the efficiency of information search. *Developmental Psychology*, 52(12), 2159–2173. <https://doi.org/10.1037/dev0000240>
- Russell, J., Alexis, D., & Clayton, N. S. (2010). Episodic future thinking in 3- to 5-year-old children: The ability to think of what will be needed from a different point of view. *Cognition*, 114(1), 56–71. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2009.08.013>
- Sabbatini, G., Stammati, M., Tavares, M. C. H., & Visalberghi, E. (2007). Response toward novel stimuli in a group of tufted capuchins (*Cebus libidinosus*) in Brasília National Park, Brazil. *American Journal of Primatology*, 69(4), 457–470. <https://doi.org/10.1002/ajp.20365>
- Santos, L.R., & Hugues, K.D. (2009). Economic cognition in humans and animals: the search for core mechanisms. *Current Opinion in Neurobiology*, 19(1), 63-66. <https://doi.org/10.1016/j.conb.2009.05.005>
- Santos, L.R., & Rosati, A.G. (2015). The evolutionary roots of human decision making. *Annual Review of Psychology*, 66, 321-347. <https://doi.org/10.1146/annurev-psych-010814-015310>
- Savage, L. J. (1954). *The foundations of statistics*, John Wiley & Sons. <https://psycnet.apa.org/record/1955-00117-000>
- Schlottmann, A. (2000). Children's judgements of gambles: A disordinal violation of utility. *Journal of Behavioral Decision Making*, 13(1), 77–89. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-0771\(200001/03\)13:1<77::AID-BDM344>3.0.CO;2-Y](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-0771(200001/03)13:1<77::AID-BDM344>3.0.CO;2-Y)

- Schlottmann, A. (2001). Children's probability intuitions: understanding the expected value of complex gambles. *Child Development*, 72(1), 103–122. <https://doi.org/10.1111/1467-8624.00268>
- Schlottmann, A., & Anderson, N. H. (1994). Children's Judgments of Expected Value. *Developmental Psychology*, 30(1), 56–66. <https://doi.org/10.1037/0012-1649.30.1.56>
- Schnell, A. K., Boeckle, M., Rivera, M., Clayton, N. S., & Hanlon, R. T. (2021). Cuttlefish exert self-control in a delay of gratification task. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 288(1946), 20203161. <https://doi.org/10.1098/RSPB.2020.3161>
- Schoemaker, P. J. H. (1982). The Expected Utility Model: Its Variants, Purposes, Evidence and Limitations. *Journal of Economic Literature*, 20(2), 529–563. <https://www.jstor.org/stable/2724488>
- Schulz, E., Wu, C. M., Ruggeri, A., & Meder, B. (2019). Searching for Rewards Like a Child Means Less Generalization and More Directed Exploration. *Psychological Science*, 30(11), 1561–1572. <https://doi.org/10.1177/0956797619863663>
- Schulz, L., & Bonawitz, E. (2007). Serious Fun: Preschoolers Engage in More Exploratory Play When Evidence Is Confounded. *Developmental Psychology*, 43(4), 1045–1050. <https://doi.org/10.1037/0012-1649.43.4.1045>
- Schwartenbeck, P., Passecker, J., Hauser, T.U., FitzGerald, T.H.B., Kronbichler, M., Friston, K.J. (2019). computational mechanisms of curiosity and goal-directed exploration. *eLife*, 8, e41703

- Schwebel, D. C., & Barton, B. K. (2005). Contributions of Multiple Risk Factors to Child Injury. *Journal of Pediatric Psychology, 30*(7), 553–561. <https://doi.org/10.1093/jpepsy/jsi042>
- Schwebel, D. C., Davis, A. L., & O’Neal, E. E. (2012). Child Pedestrian Injury: A Review of Behavioral Risks and Preventive Strategies. *American Journal of Lifestyle Medicine, 6*(4), 292–302. <https://doi.org/10.1177/0885066611404876>
- Schwebel, D. C., Gaines, J., & Severson, J. (2008). Validation of virtual reality as a tool to understand and prevent child pedestrian injury. *Accident Analysis and Prevention, 40*(4), 1394–1400. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2008.03.005>
- Siegel, A. F., & Wagner, M. R. (2022). Probability: Understanding random situations. In A. F. Siegel & M. R. Wagner, *Practical Business Statistics* (pp. 137–170). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820025-4.00006-3>
- Silberberg, A., Roma, P. G., Huntsberry, M. E., Warren-Boulton, F. R., Sakagami, T., Ruggiero, A. M., & Suomi, S. J. (2008). On Loss Aversion in Capuchin Monkeys. *Journal of the Experimental Analysis of Behavior, 89*(2), 145–155. <https://doi.org/10.1901/jeab.2008.89-145>
- Sim, Z. L., & Xu, F. (2014). Acquiring Inductive Constraints from Self-Generated Evidence. *Proceedings of the Annual Meeting of the Cognitive Science Society, 36*(36)
- Sim, Z. L., & Xu, F. (2017). Infants preferentially approach and explore the unexpected. *British Journal of Developmental Psychology, 35*(4), 596–608. <https://doi.org/10.1111/bjdp.12198>
- Simon, H. A. (1957). *Models of Man*, John Wiley & Sons.

- Simon, H. A. (1990). Bounded Rationality. In J. Eatwell, M. Milgate, & P. Newman (Eds.), *Utility and Probability*. Palgrave Macmillan. https://doi.org/10.1007/978-1-349-20568-4_5
- Simpson, G., Johnston, L., & Richardson, M. (2003). An investigation of road crossing in a virtual environment. *Accident Analysis and Prevention*, *35*(5), 787-769.
[https://doi.org/10.1016/S0001-4575\(02\)00081-7](https://doi.org/10.1016/S0001-4575(02)00081-7)
- Slovic, P. (1966). Risk-Taking in Children: Age and Sex Differences. *Child Development*, *37*(1), 169. <https://doi.org/10.2307/1126437>
- Smith, T. R., Beran, M. J., & Young, M. E. (2017). Gambling in rhesus macaques (*Macaca mulatta*): The effect of cues signaling risky choice outcomes. *Learning and Behavior*, *45*(3), 288–299. <https://doi.org/10.3758/s13420-017-0270-5>
- Smith, M.F., Watzek, J., & Brosnan, S.F. (2018). The importance of a truly comparative methodology for comparative psychology. *International Journal of Comparative Psychology*, *31*, 1-15. <https://escholarship.org/uc/item/6x91j98x>
- So, N.-Y., & Stuphorn, V. (2010). Supplementary eye field encodes option and action value for saccades with variable reward. *Journal of Neurophysiology*, *104*(5), 2634-2653.
<https://doi.org/10.1152/jn.00430.2010>
- Sobel, D. M., & Letourneau, S. M. (2018). Curiosity, Exploration, and Children’s Understanding of Learning. In M. Saylor & P.A. Ganea (eds), *Active Learning from Infancy to Childhood* (pp. 57–74). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-77182-3_4

- Southgate, V., & Verneti, A. (2014). Belief-based action prediction in preverbal infants. *Cognition*, 130(1), 1–10. <https://doi.org/10.1016/J.COgnITION.2013.08.008>
- Spohn, D. L., Devore-Suazo, I. F., Bernarding, M. L., & Güss, C. D. (2022). The role of social context in risky decision-making: Presence of friend and low resistance to peer influence increase risky decision-making. *International Journal of Psychology*, 57(6), 717–726. <https://doi.org/10.1002/IJOP.12864>
- Stauffer, W.R., Lak, A., Bossaerts, P., & Schultz, W. (2015). Economic choices reveal probability distortion in macaque monkeys. *Journal of Neuroscience*, 35(7), 3146-3154. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.3653-14.2015>
- Stearns, S. C. (2000). Daniel Bernoulli (1738): evolution and economics under risk. *Journal of biosciences*, 25(3), 221-228. <https://doi.org/10.1007/BF02703928>
- Steelandt, S., Broihanne, M.-H., Romain, A., Thierry, B., & Dufour, V. (2013). Decision-making under risk of loss in children. *PLoS ONE*, 8(1), e52316. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0052316>
- Steinberg, L. (2004). Risk Taking in Adolescence: What Changes, and Why? *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1021(1), 51–58. <https://doi.org/10.1196/ANNALS.1308.005>
- Stephens, D. W. (1981). The logic of risk-sensitive foraging preferences. *Animal Behaviour*, 29(2), 628–629. [https://doi.org/10.1016/S0003-3472\(81\)80128-5](https://doi.org/10.1016/S0003-3472(81)80128-5)
- Stephens, D. W., & Krebs, J. R. (1987). *Foraging Theory*. Princeton University Press.

- Suddendorf, T., Addis, D. R., & Corballis, M. C. (2009). Mental time travel and the shaping of the human mind. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, *364*(1521), 1317–1324. <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0301>
- Suddendorf, T., & Busby, J. (2005). Making decisions with the future in mind: Developmental and comparative identification of mental time travel. *Learning and Motivation*, *36*(2), 110–125. <https://doi.org/10.1016/j.lmot.2005.02.010>
- Suddendorf, T., & Corballis, M. C. (1997). Mental Time Travel and the Evolution of the Human Mind. *Genetic, Social & General Psychology Monographs*, *123*(2), 133-167.
- Suddendorf, T., & Corballis, M. C. (2007). The Evolution of Foresight: What Is Mental Time Travel and Is It Unique To Humans. *Behavioral and brain sciences*, *30*(299), 299–351. <https://doi.org/10.1017/S0140525X07001975>
- Suddendorf, T., & Redshaw, J. (2013). The development of mental scenario building and episodic foresight. *Annals of the New York Academy of Sciences*, *1296*(1), 135–153. <https://doi.org/10.1111/nyas.12189>
- Sumner, E. S., Steyvers, M., & Sarnecka, B. W. (2019, July). It's not the treasure, it's the hunt: Children are more explorative on an explore/exploit task than adults. *41st Annual Meeting of the Cognitive Science Society*, Montreal, Canada.
- Sutter, M., Kocher, M. G., Glätzle-Rützler, D., & Trautmann, S. T. (2013). Impatience and Uncertainty: Experimental Decisions Predict Adolescents Field Behavior. *American Economic Review*, *103*(1), 510–531. <https://doi.org/10.1257/aer.103.1.510>

- Sutter, M., Zoller, C., & Glätzle-Rützler, D. (2019). Economic behavior of children and adolescents – A first survey of experimental economics results. *European Economic Review, 111*, 98–121. <https://doi.org/10.1016/j.euroecorev.2018.09.004>
- Sweeten, G., Piquero, A. R., & Steinberg, L. (2013). Age and the Explanation of Crime, Revisited. *Journal of Youth and Adolescence, 42*(6), 921–938. <https://doi.org/10.1007/s10964-013-9926-4>
- Tabibi, Z., Pfeffer, K., & Sharif, J. T. (2012). The influence of demographic factors, processing speed and short-term memory on Iranian children’s pedestrian skills. *Accident Analysis and Prevention, 47*, 87–93. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2012.01.013>
- Tao, T., Wang, L., Fan, C., & Gao, W. (2014). Development of *self-control* in children aged 3 to 9 years: Perspective from a dual-systems model. *Scientific Reports, 4*(1), 7272. <https://doi.org/10.1038/srep07272>
- Thompson, C., Barresi, J., & Moore, C. (1997). The development of future-oriented prudence and altruism in preschoolers. *Cognitive Development, 12*(2), 199–212. [https://doi.org/10.1016/S0885-2014\(97\)90013-7](https://doi.org/10.1016/S0885-2014(97)90013-7)
- Thomson, J. A., Ampofo-Boateng, K., Lee, D. N., Grieve, R., Pitcairn, T. K., & Demetre, J. D. (1998). The effectiveness of parents in promoting the development of road crossing skills in young children. *British Journal of Educational Psychology, 68*(4), 475–491. <https://doi.org/10.1111/j.2044-8279.1998.tb01306.x>
- Thomson, J. A., Tolmie, A. K., Foot, H. C., Whelan, K. M., Sarvary, P., & Morrison, S. (2005). Influence of virtual reality training on the roadside crossing judgments of child

- pedestrians. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 11(3), 175–186.
<https://doi.org/10.1037/1076-898X.11.3.175>
- Tinbergen, N. (1963). On aims and methods of Ethology. *Zeitschrift Für Tierpsychologie*, 20(4), 410–433. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0310.1963.tb01161.x>
- Tobler, P. N., & Weber, E. U. (2013). Valuation for Risky and Uncertain Choices. In P.W. Glimcher & E. Fehr (Eds.), *Neuroeconomics: Decision Making and the Brain*. Elsevier.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-416008-8.00009-7>
- Todd, P. M., & Gigerenzer, G. (2003). Bounding rationality to the world. *Journal of Economic Psychology*, 24(2), 143–165. [https://doi.org/10.1016/S0167-4870\(02\)00200-3](https://doi.org/10.1016/S0167-4870(02)00200-3)
- Tomasello, M. (2000). *The Cultural Origins of Human Cognition*. Harvard University Press.
<https://doi.org/10.4159/9780674044371>
- Tomasello, M. (2019). *Becoming Human*. Harvard University Press.
<https://doi.org/10.4159/9780674988651>
- Tversky, A., & Kahneman, D. (1974). Judgment under uncertainty: Heuristics and biases. *Science*, 185(4157), 1124–1131. <https://doi.org/10.1126/science.185.4157.1124>
- Tversky, A., & Kahneman, D. (1981). The framing of decisions and the psychology of choice. *Science*, 211(4481), 453-458. <https://doi.org/10.1126/science.7455683>
- Tversky, A., & Kahneman, D. (1986). Rational Choice and the Framing of Decisions. *The Journal of Business*, 59(4), S251–S278. <https://www.jstor.org/stable/2352759>

Tversky, A., & Kahneman, D. (1992). Advances in prospect theory: Cumulative representation of uncertainty. *Journal of Risk and Uncertainty*, 5, 267-323.

<https://doi.org/10.1007/BF00122574>

Tversky, A., & Wakker, P. (1995). Risk Attitudes and Decision Weights. *Econometrica*, 63(6), 1255-1280. <https://doi.org/10.2307/2171769>

Twomey, K.E., & Westermann, G. (2018). Curiosity-based learning in infants: a neurocomputational approach. *Developmental Science*, 21(4), e12629.

<https://doi.org/10.1111/desc.12629>

Tymula, A., Rosenberg Belmaker, L. A., Roy, A. K., Ruderman, L., Manson, K., Glimcher, P. W., & Levy, I. (2012). Adolescents' risk-taking behavior is driven by tolerance to ambiguity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(42), 17135-17140.

<https://doi.org/10.1073/pnas.1207144109>

van Leijenhorst, L., Gunther Moor, B., Op de Macks, Z.A., Rombouts, S.A.R.B., Westenberg, P. M., & Crone, E.A. (2010). Adolescent risky decision making: Neurocognitive development of reward and control regions. *NeuroImage*, 51(1), 345-355.

<https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2010.02.038>

Van Leijenhorst, L., Westenberg, P. M., & Crone, E. A. (2008). A developmental study of risky decisions on the cake gambling task: Age and gender analyses of probability estimation and reward evaluation. *Developmental Neuropsychology*, 33(2), 179-196.

<https://doi.org/10.1080/87565640701884287>

- Van Schagen, I., & Rothengatter, T. (1997). Classroom instruction versus roadside training in traffic safety education. *Journal of Applied Developmental Psychology, 18*(2), 283–292. [https://doi.org/10.1016/S0193-3973\(97\)90042-3](https://doi.org/10.1016/S0193-3973(97)90042-3)
- Visalberghi, E., & Fragaszy, D. (1995). The behaviour of capuchin monkeys, *Cebus apella*, with novel food: The role of social context. *Animal Behaviour, 49*(4), 1089–1095. <https://doi.org/10.1006/anbe.1995.0137>
- Visalberghi, E., Janson, C. H., & Agostini, I. (2003). Response toward novel foods and novel objects in wild *Cebus apella*. *International Journal of Primatology, 24*(3), 653–675. <https://doi.org/10.1023/A:1023700800113>
- Von Neumann, J., & Morgenstern, O. (1944). *Theory of games and economic behavior*. Princeton University Press.
- Wade, S., & Kidd, C. (2019). The role of prior knowledge and curiosity in learning. *Psychonomic Bulletin & Review, 26*(4), 1377–1387. <https://doi.org/10.3758/s13423-019-01598-6>
- Weber, E. U., Shafir, S., & Blais, A. R. (2004). Predicting Risk Sensitivity in Humans and Lower Animals: Risk as Variance or Coefficient of Variation. *Psychological Review, 111*(2), 430–445. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.111.2.430>
- Weller, J. A., Levin, I. P., & Denburg, N. L. (2011). Trajectory of risky decision making for potential gains and losses from ages 5 to 85. *Journal of Behavioral Decision Making, 24*(4), 331–344. <https://doi.org/10.1002/bdm.690>

- Whitebread, D., & Neilson, K. (2000). The contribution of visual search strategies to the development of pedestrian skills by 4-11 year-old children. *British Journal of Educational Psychology*, 70(4), 539–557. <https://doi.org/10.1348/000709900158290>
- Wilson, T. D., & Gilbert, D. T. (2003). Affective Forecasting. *Advances in Experimental Social Psychology*, 35(35), 345–411. [https://doi.org/10.1016/S0065-2601\(03\)01006-2](https://doi.org/10.1016/S0065-2601(03)01006-2)
- Wolf, W., & Tomasello, M. (2020). Human children, but not great apes, become socially closer by sharing an experience in common ground. *Journal of Experimental Child Psychology*, 199, 104930. <https://doi.org/10.1016/J.JECP.2020.104930>
- Xu, F., & Garcia, V. (2008). Intuitive statistics by 8-month-old infants. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(13), 5012–5015. <https://doi.org/10.1073/pnas.0704450105>
- Xu, E.R., & Kralik, J.D. (2014). Risky business: Rhesus monkeys exhibit persistent preferences for risky options. *Frontiers in Psychology*, 5, 1-12. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2014.00258>
- Yamada, H., Tymula, A., Louie, K., & Glimcher, P. W. (2013). Thirst-dependent risk preferences in monkeys identify a primitive form of wealth. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(39), 15788–15793. <https://doi.org/10.1073/pnas.1308718110>
- Ye, Y., Wong, S. C., Li, Y. C., & Lau, Y. K. (2020). Risks to pedestrians in traffic systems with unfamiliar driving rules: a virtual reality approach. *Accident Analysis and Prevention*, 142, 105565. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2020.105565>

Zhu, Y., Wang, J., Lv, X., & Li, Y. (2016). Once failed, twice shy: How group-based competition influences risk preference in young children. *Journal of Experimental Psychology: General*, 145(4), 397-401. <https://doi.org/10.1037/xge0000156>

Zoratto, F., Oddi, G., Gori, E., Micucci, A., De Petrillo, F., Paglieri, F., Adriani, W., Laviola, G., & Addessi, E. (2018). Social modulation of risky decision-making in rats (*Rattus norvegicus*) and tufted capuchin monkeys (*Sapajus* spp.). *Behavioural Brain Research*, 347, 37–48. <https://doi.org/10.1016/j.bbr.2018.02.033>

Résumé

Cette thèse traite du « goût du risque » (i.e., la préférence d'un individu pour les options comportant le plus d'incertitude) sous l'angle de trois différentes disciplines : l'économie comportementale, l'éthologie et la psychologie du développement. Sollicitant les approches développementale et comparative, nous étudions le comportement face au risque chez les êtres humains et les primates non humains. Plus particulièrement, nous explorons la trajectoire développementale de la prise de décision sous risque de gain chez l'enfant ainsi que l'influence de la nouveauté sur ce type de décision. Ce travail s'ouvre sur une introduction aux notions de risque et de prise de décision sous risque à travers une approche historique de leur sémantique et des modèles décisionnels en économie (partie 1). Nous présentons les modèles prescriptifs de la décision face à l'incertitude et au risque, puis leur remise en question par les approches psychologiques. Adoptant le cadre d'étude utilisé en éthologie, nous examinons ensuite l'attitude face au risque à travers différents prismes : la phylogenèse, l'ontogenèse, la valeur adaptative et les mécanismes. Dans la partie 2, nous explorons la prise de décision face au risque chez les primates non humains et les enfants humains. La partie 3 comprend les articles produits durant ce travail de thèse, chacun d'entre eux explorant un aspect spécifique de la prise de décision sous risque. La première étude empirique de cette thèse explore l'influence de la nouveauté sur la prise de décision sous risque chez 24 enfants humains âgés de 2 ans et demi et 7 singes capucins bruns. Nous sollicitons un jeu économique où les participants doivent choisir entre deux options : une option garantie et une option risquée caractérisée par un événement inattendu. Nos résultats indiquent que la nouveauté exerce une influence sur la prise de décision sous risque différente chez les singes capucins et les enfants humains. Nous émettons les hypothèses que (i) l'aversion pour le risque dans le domaine du gain chez les capucins reflète une stratégie d'exploitation, et (ii) l'appétence au risque chez les enfants humains reflète une stratégie exploratoire liée à leur attrait pour la nouveauté. Le deuxième article analyse la prise de décision sous risque de gain chez 225 enfants âgés de 7 à 9 ans dans la tâche utilisée dans notre premier article. Nos résultats montrent une réduction de l'attrait pour le risque entre sept et neuf ans. En outre, nous observons une sélection plus fréquente de la nouveauté associée à un risque que celle associée à une garantie. L'attrait pour le risque chez les enfants serait ainsi sous-tendu davantage par une exploration de l'incertitude que par un attrait pour la nouveauté. Le troisième article explore la prise de décision face au risque dans différents contextes chez 60 enfants âgés entre 7 et 9 ans. Il associe un jeu économique et une tâche impliquant un risque physique en situation de traversée de route en réalité virtuelle. Nos résultats montrent que les enfants identifiés comme preneurs de risque dans le domaine économique sont plus susceptibles de faire face à des accidents dans le domaine physique. En outre, la présence d'un véhicule inattendu provoque une diminution de la prudence sur le passage piéton. Là encore, nous considérons qu'une stratégie de recherche exploratoire peut conduire à une augmentation de la prise de risque chez l'enfant. La partie 4 est consacrée à l'analyse et à la discussion des principaux résultats empiriques obtenus. Enfin, nous proposons des ouvertures pour les recherches futures réalisées dans le domaine de la prise de décision sous risque.