



HAL
open science

La sensibilité aux contingences sensorimotrices chez le bébé et son rôle dans le développement du savoir-faire corporel

Lisa Jacquey

► **To cite this version:**

Lisa Jacquey. La sensibilité aux contingences sensorimotrices chez le bébé et son rôle dans le développement du savoir-faire corporel : Approche croisée en robotique et psychologie du développement. Psychologie. Université de Paris, 2019. Français. NNT: . tel-04004251v1

HAL Id: tel-04004251

<https://hal.science/tel-04004251v1>

Submitted on 1 May 2020 (v1), last revised 24 Feb 2023 (v2)

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.

Université de Paris

École doctorale Frontières de l'Innovation en Recherche et Éducation 474

Integrative Neuroscience and Cognition Centre - UMR 8002 (CNRS & Université de Paris)
Laboratoire Ethologie Cognition Développement (Université Paris Nanterre)

La sensibilité aux contingences sensorimotrices chez le bébé et son rôle dans le développement du savoir-faire corporel

*Approche croisée en robotique et psychologie du
développement*

Par Lisa Jacquety

Thèse de doctorat de Sciences Cognitives

Dirigée par Rana Esseily
Et par Kevin O'Regan

Présentée et soutenue publiquement le 13 novembre 2019

Devant un jury composé de :

Rana Esseily, Maître de Conférences, Université Paris Nanterre, directrice
Kevin O'Regan, Émérite, CNRS & Université de Paris, co-directeur
Daniela Corbetta, Professor, University of Tennessee, rapporteur
Philippe Rochat, Professor, Emory University, rapporteur
Pierre-Yves Oudeyer, Directeur de Recherche, INRIA, membre du jury
Jacqueline Fagard, Émérite, CNRS & Université de Paris, membre du jury

三つ子の魂百まで

Résumé

Français

Au regard de la place croissante occupée par l'intelligence artificielle dans nos sociétés, la nécessité d'affiner notre compréhension de la notion d'apprentissage semble plus importante que jamais. S'intégrant dans une telle optique, cette thèse de doctorat cherche à mettre en lumière les mécanismes d'apprentissage permettant au bébé d'acquérir au cours de la première année de vie une utilisation appropriée et différenciée de son corps lui permettant d'interagir de manière efficace avec son environnement physique et social, ce que nous désignons ici par le terme de « savoir-faire corporel ». Le postulat au cœur de ce travail de recherche est le suivant : l'acquisition progressive du savoir-faire corporel au cours de la vie foetale et des premiers mois de vie *post-partum* est sous-tendue par deux mécanismes d'apprentissage, l'exploitation de la sensibilité aux contingences sensorimotrices et la motivation intrinsèque. Ce travail de thèse explore la première partie de ce postulat, c'est-à-dire sur le rôle joué par la sensibilité aux contingences sensorimotrices dans le développement du savoir-faire corporel. Afin d'investiguer cette hypothèse, ce travail de thèse se concentre dans un premier temps sur l'analyse critique des données expérimentales déjà existantes sur le sujet, à la fois en psychologie du développement et en robotique développementale. Dans un second temps, cette recherche vise à approfondir notre compréhension de l'acquisition du savoir-faire corporel à travers l'expérimentation chez le bébé âgé de moins d'un an.

Anglais

Considering the growing importance of artificial intelligence in our society, it seems more important than ever to improve our understanding of the concept of learning. In this context, this PhD thesis investigates how during the first year of life, babies learn to use their body in a differentiated way in order to interact effectively with their physical and social environment. We refer to this capacity as “body know-how”. The underlying assumption of our research is that progressive acquisition of body know-how during the first months of life is driven by two learning mechanisms: the exploitation of sensitivity to sensorimotor contingencies, and intrinsic motivation. In this thesis, we explore the first part of this premise, i.e. the role played by sensitivity to sensorimotor contingencies in the acquisition of body know-how. We focus initially on a critical analysis of existing experimental data on the subject, both in developmental psychology and developmental robotics. In a second step, our work aims to improve our understanding of the acquisition of body know-how through experiments with babies during the first months of life.

Remerciements

Un immense merci aux familles volontaires qui m'ont permis de réaliser ce travail de recherche.

Je remercie Daniela Corbetta et Philippe Rochat d'être rapporteurs de cette thèse, et Pierre-Yves Oudeyer d'en être membre du jury. Vos travaux ont été au cœur de mes réflexions durant ces trois dernières années et c'est avec impatience que j'appréhende vos commentaires et conseils.

Merci à Anne Christophe et Mehdi Khamassi de m'avoir accompagnée en tant que tuteurs de thèse durant ces trois années, nos rencontres ont eu une grande importance dans mon cheminement.

Mes premières pensées vont à Kevin, qui m'a accueillie en septembre 2014 dans son équipe et m'a offert depuis un cadre bienveillant et chaleureux. Merci de m'avoir donné la chance de faire de la recherche. Merci de m'avoir appris que la science est avant tout un plaisir, d'avoir traité mes idées et celles des autres avec respect, et de m'avoir enseigné à ne jamais me contenter de la facilité.

Merci Rana d'être devenue ma directrice de thèse, cela a été pour moi une chance immense. Ta confiance et ton optimisme dans les moments de doute ont été précieux. Merci de ton soutien dans les projets que j'entreprends, ta présence me permet d'envisager l'avenir plus sereinement. Et merci de m'avoir montré que l'on peut être sans compromis une chercheuse-femme-professeure-mère heureuse, drôle et forte.

Merci à Jacqueline d'avoir été présente tout au long de ces cinq années : ton expertise, tes remarques et tes idées ont été essentielles. Merci aussi pour les goûters et les dîners chez vous ; mes années de thèse en garderont la saveur.

Merci surtout à tous les trois pour les rires partagés, les discussions animées, les voyages et tout ce qui a fait de cette thèse une période heureuse !

Merci à toute l'équipe FEEL. À Eszter pour m'avoir formée à la recherche et pour cette visite mémorable de Budapest sous la neige ! À Alex et Guglielmo de m'avoir entraînée dans vos projets rigolos et de m'avoir offert de bien nombreux cafés ; Guglielmo merci d'être devenu apprenti-chercheur en psychologie du développement avec moi. Merci à Lauriane pour les conseils en stats et sur R, ils m'auront été utiles jusqu'à la dernière minute. Merci évidemment à Sergiu, Judith, Yasmine et Alice d'avoir tout simplement mené avec moi une partie de ce projet de thèse et d'y avoir apporté vos réflexions, vos projets, vos expertises... vos rires, vos blagues et votre joie de vivre !

Merci à l'ensemble du projet GOAL-Robots d'avoir rendu cette thèse possible et de m'avoir permis de découvrir le monde de la robotique. Grazie mille a Gianluca, Francesco, Valerio, Vieri e Beste per le discussioni su skype, i consigli su Roma e il prezioso aiuto.

Merci à l'ensemble des membres du LPP (enfin du INCC), à Thierry pour m'avoir ouvert les portes du labo alors que je n'étais qu'en L3, à Judit pour m'avoir intégrée dans ses projets, à toute l'équipe du BabyLab pour l'aide indispensable les samedis (et le reste de la semaine) — Viviane, Lucie, Patrick, Maxine, Anthony : merci — aux filles de 608 pour vos rires, et à la bande du 4ème pour le quotidien heureux. Merci à l'équipe PACD pour les réunions chaleureuses, la parole libre et les conseils pertinents. Une pensée particulière pour Klara, merci pour ton infaillible soutien durant les derniers instants de la thèse, merci pour ton aide sur LateX (l'esthétique de mon manuscrit te doit beaucoup), et merci de m'avoir fait découvrir une autre manière de vivre la recherche. Merci, aussi et surtout, pour ton amitié précieuse.

Merci à l'ensemble de l'équipe du labo de Nanterre et plus particulièrement aux membres du BabyLab. Ce fut une chance de découvrir une autre manière de faire de la recherche en développement. Merci de m'avoir donné l'opportunité d'enseigner, cela a été pour moi une belle révélation. Je suis ravie de continuer avec vous l'année prochaine.

Merci à François pour m'avoir un jour partagé son envie de faire entrer la petite enfance au CRI, le Lab Premiers Cris est une réussite. Merci Marion d'être une associée hors-pair, de m'avoir ouvert à de nouveaux horizons et de partager ton énergie rayonnante ! Merci au MotionLab pour l'aide sur ce projet et pour m'avoir accueillie dans votre joyeux bureau.

Merci aux ami.e.s de Scalp!, j'ai apprécié d'avoir pu donner avec vous du sens à ma formation en recherche et d'avoir ouvert un autre champ des possibles.

Merci à celles et ceux qui ont si gentiment accepté de relire ma thèse et d'y chasser les méchantes fautes.

Passons maintenant au soutien moins scientifique mais tout aussi essentiel. Merci avant tout à ma famille. Merci maman de m'avoir transmis ton amour des sciences et de la nature, d'avoir cousu et recousu mon matériel expérimental, et pour ton remarquable courage ces trois dernières années. Merci papa pour les appels le soir en sortant tard du labo, pour avoir suivi avec attention chaque étape de mon travail (avec notes si besoin), et surtout pour m'avoir donné confiance en mes choix. Merci à vous deux d'avoir pris tant soin de moi durant cette période parfois intense de rédaction. Merci Thomas d'être mon grand frère, ton regard est primordial.

Merci à la famille Granier-Fauquert de m'avoir accueillie parmi vous et soutenue, je me fais une joie du temps à venir à vos côtés.

Merci mille fois aux ami.e.s, à celles et ceux qui se demandent ce je fabrique de mes journées mais qui m'encouragent sans relâche, et à celles et ceux qui partagent les hauts et les bas de la thèse — en vrac, Laure-Line, Bastien, Xavier, Roxane, Cédric, Romain, Sarah, Dorian, Alex, Justine, Clara et les autres.

Merci à Paul d'avoir été la douce brise d'été de ces trois années, leur donnant le parfum lumineux d'un 31 août à la mer.

Table des matières

Résumé	i
Remerciements	iii
Table des matières	v
Liste des figures et des tableaux	vii
Préambule	xi
Introduction générale	1
Introduction	1
Mécanismes d'apprentissage	2
Développement du savoir-faire corporel	17
Conclusion	20
Questions de recherche	21
Detection of sensorimotor contingencies in infants	25
Introduction	26
Characteristics of action and feedback	27
Contingency parameters	32
Amount and frequency of exposure	40
Inter-individual differences	45
Conclusion	50
Sensorimotor contingencies as a key drive of development	53
Introduction	54
Body knowledge	55
Memory	60
Generalization	63

Goal-directedness	67
Blueprint architecture	72
Conclusion and perspectives	76
Développement du savoir-faire corporel	79
Introduction	80
Mécanismes mis en jeu	81
Exploration du corps	82
Interaction avec l'environnement physique	84
Interaction avec l'environnement social	90
Conclusion	93
Development of body know-how: from global to local?	95
Introduction	96
Method	100
Results	103
Discussion	107
Conclusion	110
Série d'études pilotes	111
Introduction	112
Méthode	113
Mise en place d'un nouveau protocole expérimental	121
Analyses des données	138
Discussion	160
Discussion générale	165
Questions de recherche et réponses apportées	165
Limites méthodologiques et théoriques	168
Perspectives d'application à la robotique	179
Ouverture	183
Conclusion générale	193
Références	199

Liste des figures

I.1	« Playground experiment »	3
I.2	Paradigme du mobile	7
2.1	Blueprint architecture	73
3.1	Savoir-faire corporel : paradigmes	89
4.1	Experimental design	102
4.2	Results: Contingency sensitivity	104
4.3	Results: Arm differentiation	106
5.1	Méthode expérimentale	114
5.2	Vue d'ensemble des pilotes	122
5.3	Pilote E	129
5.4	Pilote F	131
5.5	Influence de l'âge (1)	141
5.6	Influence de l'âge (2)	141
5.7	Influence des conditions d'exposition	143
5.8	Influence du nombre de sessions	145
5.9	Influence du seuil	147
5.10	Influence du bras « connecté »	148
5.11	Influence de l'axe « connecté »	150
5.12	Influence du paramètre spatial	151
5.13	Influence du paramètre spatial x âge	153
5.14	Capacités de transfert	155
5.15	Capacités de transfert x âge	155
5.16	Capacités de généralisation	157
5.17	Capacités de généralisation x âge	158
5.18	Durée de l'étude : une mesure de l'apprentissage ?	159

D.1 Réponse comportementale typique	171
D.2 Tâche de déviation de Tolman	189
D.3 Tâche à choix successifs	191

Liste des tableaux

I.1	Conditionnement opérant chez le bébé (1)	6
I.2	Conditionnement opérant chez le bébé (2)	6
2.1	Contingency learning : experimental procedures	56
4.1	Information on participants	100
5.1	Pilotes : facteurs modifiés	117
5.2	Critères d'attribution des scores	118
5.3	Codage vidéo	120
5.4	Vue d'ensemble des Pilotes	121
5.5	Programme d'entraînement Pilote E	128
5.6	Programme d'entraînement Pilote F	130

Préambule

Cette thèse a été réalisée dans le cadre de deux projets européens : le projet **FEEL**, porté par Kevin O'Regan, consacré à la théorie sensorimotrice de la conscience, et le projet **GOAL-Robots** mené en collaboration avec trois équipes de recherche en robotique (ISTC-CNR, FIAS et TuDA, coordinateur du projet : Gianluca Baldassarre, ISTC-CNR) et dont le but est de développer un robot capable d'apprentissage autonome et non-supervisé. Cette thèse s'inscrit ainsi à la frontière entre deux disciplines, la psychologie du développement et la robotique du développement. Cependant, il est nécessaire de signaler que cette thèse s'ancre essentiellement dans le champ de la psychologie du développement, et que son auteure a une formation et une expertise naissante dans ce domaine, et non en robotique (avec toutefois un intérêt certain pour ce que la robotique apporte à l'étude du comportement du bébé). Ainsi, les résultats de ces trois années de recherche — trois revues de la littérature (Chapitres 1, 2 et 3) et deux études expérimentales, dont l'une pilote (Chapitres 4 et 5) — se sont principalement concentrées sur le développement sensorimoteur du bébé âgé de moins d'un an.

La robotique du développement a toutefois joué un rôle décisif dans la réalisation de cette thèse. En effet, l'enjeu de ces recherches n'a pas uniquement été de comprendre le développement du bébé avec les outils de la psychologie, mais aussi de proposer, en collaboration avec l'équipe du ISTC-CNR, une prise en compte des travaux de robotique dans l'interprétation des comportements du bébé, et une application des conclusions obtenues chez le bébé à la robotique. L'intégration de la robotique du développement dans ce travail de recherche a alors permis d'établir des liens entre les deux domaines, liens qui méritent d'être mis en lumière. Ainsi, l'introduction de cette thèse souligne l'apport des travaux de robotique pour la compréhension du développement du bébé, et la troisième partie de la discussion examine l'intérêt que le présent travail espère avoir en retour pour cette discipline. Il est alors essentiel de noter que cette thèse ne prétend pas appréhender avec justesse la littérature, les concepts et les algorithmes utilisés en robotique, mais propose une lecture des travaux de ce domaine au travers du prisme de la psychologie du développement.

Ces recherches ont bénéficié des précieux conseils de nombreux collègues en psychologie du développement — pour en citer quelques un.e.s, Michael Goldstein, Sabine Hunnius, Andy Bremner, Lorijn Zaadnoordijk, Hana D'Souza, Ben Kenward, Carolyn Granier-Deferre — ainsi que de la bienveillance de la communauté des roboticien.ne.s du développement, rencontrée à travers des conférences, des workshops et des amitiés.

Introduction générale

1 Introduction

Nous souhaitons débiter par une brève introduction de l'approche adoptée au sein de ce travail de thèse. Celle-ci ayant déterminé l'ensemble de nos travaux, sa présentation offrira au lecteur une meilleure compréhension du cheminement que nous avons suivi.

L'objectif de ce travail de recherche était de comprendre le développement du savoir-faire corporel du bébé durant les premiers mois de la vie. Nous nous sommes pour cela appuyés sur les travaux existants en psychologie du développement, que nous avons prolongés par deux études expérimentales. Néanmoins, l'originalité de notre approche a été d'intégrer à notre compréhension du comportement du bébé les algorithmes d'apprentissage utilisés en robotique du développement. L'enjeu de cette discipline est en effet très proche de celui de la psychologie du développement : comprendre comment un agent acquiert des compétences sensorimotrices, cognitives et sociales, telles que manipuler des objets, utiliser un outil ou communiquer avec ses partenaires sociaux. Les roboticiens cherchent à développer des algorithmes pouvant être le support d'une grande variété d'apprentissages non déterminés à l'avance. Une réussite dans le domaine est l'utilisation d'*algorithmes de curiosité* (voir [Asada et al., 2009](#); [Baldassarre & Mirolli, 2013](#); [Cangelosi & Schlesinger, 2015](#), pour des revues de la littérature) dotant les agents de deux capacités et (presque) aucune autre connaissance préalable : (i) la capacité de détecter le lien entre leurs actions et les conséquences de leurs actions (sensibilité aux contingences sensorimotrices) et (ii) la capacité d'organiser l'exploration de leur environnement de manière à optimiser leur apprentissage (motivation intrinsèque). Équipés de tels algorithmes, des agents simulés ou incarnés ont montré des capacités d'apprentissage satisfaisantes (voir par ex. la revue de question de [Baldassarre & Mirolli, 2013](#)) et comparables dans certains cas aux trajectoires développementales observées chez le bébé (par ex. [Moulin-Frier et al., 2014](#)). Ces algorithmes peuvent-ils alors nous aider à mieux comprendre les comportements du bébé ? Partant de l'hypothèse que oui, nous avons étudié le développement du savoir-faire corporel à travers la sensibilité aux contingences sensorimotrices

et la motivation intrinsèque, telles que ces notions sont définies et utilisées par les roboticiens. L'objet de la première partie de cette introduction est de définir ces deux notions, de comprendre leur utilisation en robotique et de chercher des parallèles implicites ou explicites en psychologie du développement. Nous appliquerons ensuite dans une seconde partie ces réflexions au sujet central de ce travail de recherche, le développement du savoir-faire corporel. Une dernière partie viendra clore cette introduction générale en présentant brièvement nos questions de recherche et la structure de ce travail de thèse.

2 Mécanismes d'apprentissage explorés dans nos travaux

Cette section présente successivement les deux mécanismes d'apprentissage au cœur des travaux des roboticiens que nous avons choisis d'explorer durant ce travail de thèse : l'exploitation de la sensibilité aux contingences sensorimotrices et la motivation intrinsèque. Pour chacun de ces mécanismes, nous commençons par donner une définition générale, puis nous détaillons la manière dont celui-ci est implémenté en robotique du développement, et enfin nous examinons les références implicites et explicites à celui-ci dans les travaux en psychologie du développement.

2.1 Sensibilité aux contingences sensorimotrices

2.1.1 Définition de la sensibilité aux contingences sensorimotrices

Le concept de contingences sensorimotrices a été introduit par MacKay (1962, 1967, 1973), puis popularisé principalement grâce aux travaux de O'Regan (O'Regan, 2011; O'Regan & Noë, 2001). La sensibilité aux contingences sensorimotrices¹ correspond à la capacité d'un agent à détecter les régularités entre ses actions et leurs conséquences (sensorielles). Par exemple, l'appui sur un bouton suivi de l'apparition d'une image sur un écran (voir Kenward, 2010, pour une illustration chez le bébé). Les contingences sensorimotrices impliquant une réponse d'un partenaire social (contingences sociales) peuvent être distinguées de celles impliquant l'environnement physique (voir Tarabulsky et al., 1996).

2.1.2 Utilisation de la sensibilité aux contingences sensorimotrices en robotique

Implémentation de la sensibilité aux contingences sensorimotrices en robotique. L'apprentissage autonome montré par certains agents repose actuellement sur la sensibilité de ces agents aux régularités entre leurs actions et les conséquences de ces actions, et la capacité de ces agents à exploiter cette sensibilité (par ex. Baldassarre et al., 2018; Nagai & Asada, 2015; Baranes & Oudeyer, 2013). Prenons par exemple le travail fondateur de Oudeyer et al. (2007)

¹A noter que le terme de « contingence » n'est pas utilisé ici dans son acception philosophique classique (ce dont l'existence n'est pas nécessaire, ce qui peut être ou peut ne pas être).

dans lequel un robot-chien AIBO ne possédant pas de connaissance préalable sur son corps, sur ses récepteurs sensoriels et sur ses moyens d'interaction avec le monde, apprend de manière autonome et non-supervisée — c'est-à-dire sans qu'un ensemble de tâches dont la réalisation par l'agent est récompensée ne soit déterminé à l'avance — à interagir avec son environnement physique et social (voir Figure I.1). Pour ce faire, AIBO possède la capacité de relier les actions qu'il réalise dans un espace moteur aux changements sensoriels qu'il perçoit dans un espace sensoriel, ce qui lui permet de construire un espace sensorimoteur correspondant à ses moyens d'interaction avec le monde.



Figure I.1 – « Playground Experiment » (à partir de Oudeyer et al., 2005).

L'utilisation de ce type d'architecture a permis de créer des systèmes capables d'acquérir par eux-mêmes des compétences motrices telles que les mouvements oculaires (par ex. Klimmasch et al., 2018) et le geste de prise (par ex. Natale et al., 2005), des fonctions cognitives comme le langage (par ex. Moulin-Frier et al., 2014) et l'utilisation d'outils (par ex. Forestier & Oudeyer, 2017), des compétences sociales telles que l'attention conjointe (par ex. Kaplan & Hafner, 2006) et la prosocialité (par ex. Nagai & Asada, 2015) ou encore des capacités plus complexes comme le développement de la séparation corps/environnement et de la séparation objets/partenaires sociaux (par ex. Oudeyer et al., 2007), le développement du schéma corporel (par ex. Mannella et al., 2018) ou le développement d'une perception de soi (par ex. Lanillos et al., 2017).

Limites de l'utilisation de la sensibilité aux contingences sensorimotrices en robotique.

L'implémentation de la sensibilité aux contingences sensorimotrices chez un agent nécessite que ce dernier soit capable de relier une commande motrice à ses conséquences perceptives, autrement

dit de réaliser une correspondance (*mapping*) entre des points de l'espace moteur (commandes motrices) et des points de l'espace sensoriel (retours perceptifs). Cela pose alors trois problèmes (voir Oudeyer et al., 2013) : (i) certains points de l'espace sensoriel ne peuvent pas être reliés à des points de l'espace moteur (les événements inatteignables par l'agent ou physiquement impossibles), (ii) l'espace moteur et l'espace sensoriel sont chacun de très grande dimension : l'agent possède un très grand nombre d'effecteurs et de récepteurs ; de plus, ses sorties motrices et entrées sensorielles ne sont pas discrètes mais continues et dynamiques, et (iii) l'espace sensorimoteur à construire est immense : explorer l'ensemble des points de l'espace moteur afin d'expérimenter leurs conséquences dans l'espace sensoriel demanderait un temps extrêmement long. Pour répondre à ces défis, les roboticiens ont envisagé plusieurs solutions s'inspirant du développement du bébé humain (pour lequel ces défis s'appliquent aussi). La première solution proposée consiste à réduire l'espace sensorimoteur d'un agent en s'inspirant des contraintes auxquelles est soumis le bébé : d'une part, les contraintes physiologiques et maturationnelles au niveau moteur (par ex. la musculature du bébé ne lui permet pas de réaliser certaines actions avant un âge donné) et perceptif (les récepteurs sensoriels ne sont pas positionnés uniformément sur le corps) et, d'autre part, les contraintes environnementales (par ex. les caractéristiques de l'environnement intra utérin). L'application de ce constat à la robotique a par exemple permis à l'équipe de Kuniyoshi (Mori & Kuniyoshi, 2010; Yamada et al., 2016) de reproduire certains aspects du développement du fœtus humain en utilisant les contraintes motrices, sensorielles et environnementales. Une seconde solution adoptée par les roboticiens consiste à réduire les dimensions de l'espace moteur et de l'espace sensoriel en s'inspirant des synergies motrices (par ex. celle mis en jeu dans la marche bipède) et du traitement spécifique de certains stimuli (par ex. la perception des visages) observés chez le bébé, ce qui revient en robotique à doter un agent de « primitives motrices » et de « primitives sensorielles ». Prenons par exemple le geste d'atteinte. Le mouvement réalisé par l'agent n'est plus représenté dans l'espace moteur par la myriade de petits mouvements qui permettent cette action, mais par un point unique, noté sous l'étiquette « mouvement de la main vers l'objet ». Similairement, la sensation au niveau de la main est représentée dans l'espace sensoriel par un seul point « contact tactile entre la main et l'objet », et non par l'ensemble des différents points de contact entre la main et l'objet. Une telle stratégie a par exemple été utilisée par Oudeyer et al. (2007) pour le roboticien AIBO. De plus, certains roboticiens ont aussi implémenté des « réflexes » dans leurs agents, comme par exemple Ugur et al. (2015) qui ont implémenté un réflexe de fermeture de la main au contact d'un objet. Néanmoins, il convient de noter que l'utilisation de primitives ou de réflexes peut être considérée comme une limite en robotique, l'objectif des roboticiens étant de développer des agents capables d'un apprentissage non-prédéterminé et pouvant s'adapter à tout type de tâche et d'environnement (voir par ex. la section « 1.2.6 Limits and perspectives » de Oudeyer et al. (2013)). Une troisième solution envisagée consiste à prodiguer au robot un accompagnement

social dans ses apprentissages, à l’instar de l’étayage (*scaffolding*) offert au bébé par ses partenaires sociaux. Ceux-ci aident en effet le bébé à orienter son exploration de l’environnement, par exemple en pointant du doigt les jouets dont ils prononcent le nom ou en encourageant la réalisation de certains gestes par la voix ou le regard (voir par ex. Yu & Smith, 2012; Goldstein & Schwade, 2008; Gros-Louis et al., 2006, pour l’apprentissage du vocabulaire ; ou les travaux sur la pédagogie naturelle, voir par ex. Csibra & Gergely, 2009). Un tel guidage social a par exemple été mis en place en robotique dans les travaux de Forestier & Oudeyer (2017).

2.1.3 Références à la sensibilité aux contingences sensorimotrices en psychologie du développement

Nous présentons dans cette section, d’une part, des exemples de travaux expérimentaux suggérant l’existence d’une sensibilité aux contingences sensorimotrices chez le bébé dès le plus jeune âge et, d’autre part, des travaux théoriques proposant (de manière implicite ou explicite) l’exploitation de la sensibilité aux contingences sensorimotrices comme mécanisme d’apprentissage chez le bébé.

Preuves d’une sensibilité aux contingences sensorimotrices chez le bébé. Les preuves d’une sensibilité aux contingences sensorimotrices chez le bébé ont principalement été apportées via l’utilisation du conditionnement opérant² (voir Tableau I.1 pour une description). Cette méthodologie a été développée dans la littérature animale (Skinner, 1938), puis adaptée à l’étude du comportement du bébé à partir des années 1960 (par ex. Lipsitt et al., 1966; Rovee & Rovee, 1969; Siqueland & Delucia, 1969). Elle a été très largement exploitée entre les années 1970 et 2000 grâce au développement de différents paradigmes expérimentaux (voir Tableau I.2) parmi lesquels la succion non-nutritive (par ex. DeCasper & Fifer, 1980) et le paradigme du mobile (par ex. Rovee-Collier et al., 1980) (voir Figure I.2).

Les résultats des études utilisant le conditionnement opérant suggèrent que la sensibilité aux contingences sensorimotrices est présente chez le bébé dès la naissance. Cela s’illustre par exemple à travers le succès de la succion non-nutritive chez le nouveau-né : les bébés semblent capables à la naissance de détecter la régularité entre l’une de leurs actions et un stimulus auditif ou visuel (par ex. la voix de leur mère, voir DeCasper & Fifer, 1980). Par ailleurs, l’utilisation de l’échographie 4D a apporté des preuves de l’existence d’une sensibilité aux contingences sensorimotrices chez le fœtus. Il a en effet été observé chez le fœtus des mouvements de main dirigés vers les yeux et vers la bouche présentant des cinématiques différentes (Myowa-Yamakoshi & Takeshita, 2006; Reissland et al., 2014), observation qui suggère une sensibilité du fœtus aux régularités entre ces

²La majorité des travaux utilisant le conditionnement opérant n’ont pas eu pour objet d’étude la sensibilité des bébés aux contingences sensorimotrices, mais ont utilisé cette sensibilité afin d’explorer d’autres domaines du développement tels que la mémoire (par ex. Rovee-Collier et al., 1980), les émotions (par ex. Sullivan & Lewis, 1989) ou le langage (par ex. DeCasper & Fifer, 1980). Néanmoins, ces études apportant de manière indirecte des informations sur la sensibilité aux contingences sensorimotrices chez le bébé, nous intégrons celles-ci sans distinction à notre analyse.

mouvements et leurs conséquences sensorielles. A noter qu'une présentation détaillée des travaux portant sur la sensibilité aux contingences sensorimotrices chez le bébé est donnée au [Chapitre 1](#) et au [Chapitre 2](#).

Le conditionnement opérant chez le bébé consiste à renforcer positivement une action du bébé (par ex. téter) à l'aide d'un stimulus considéré comme plaisant ou intéressant pour le bébé (par ex. entendre la voix de sa mère). Le conditionnement comporte généralement trois phases : (1) la phase de niveau de base durant laquelle le bébé n'est pas exposé à la contingence sensorimotrice, (2) la phase d'acquisition qui correspond à la période d'exposition à la contingence sensorimotrice, et (3) la phase d'extinction qui est similaire au niveau de base (pas d'exposition à la contingence sensorimotrice). Afin de déterminer si le bébé a été sensible ou non au conditionnement, le nombre d'occurrences de l'action contingente est mesuré durant chacune des phases du conditionnement. Il est alors admis que le bébé a été sensible au conditionnement dès lors qu'il présente un nombre plus élevé d'occurrences de l'action contingente en phase d'acquisition et/ou en phase d'extinction qu'en phase de niveau de base. Le « critère d'apprentissage » le plus communément utilisé est le suivant : le bébé a appris la contingence s'il présente une fréquence d'occurrence de l'action contingente 1.5 fois supérieure à celle observée en phase de niveau de base durant 2 minutes parmi 3 minutes consécutives de la phase d'acquisition (celle-ci étant fréquemment d'une durée de 9 minutes et séparée pour les analyses en trois périodes de 3 minutes) (voir par ex. Fagen et al., 1984). Un autre « critère d'apprentissage » est la présence d'une vague de réaction en phase d'extinction, appelée « extinction burst », qui correspond à une augmentation rapide puis une diminution rapide du nombre d'occurrences de l'action contingente à l'arrêt de l'exposition à celle-ci (voir par ex. Zaadnoordijk et al., 2018b). La pertinence de ces différents critères sera examinée en discussion générale (Section 2).

Tableau I.1 – Description du conditionnement opérant chez le bébé.

	Succion non-nutritive	Paradigme du mobile	Mouvements du corps	Contingence du regard	Appui sur un bouton
Action	Succion d'une tétine	Mouvements de jambe ou bras	Mouvements de jambe ou bras	Position du regard	Appui sur un bouton
Retour sensoriel	Image sur un écran, voix, etc.	Mouvements d'un mobile	Vidéos des mouvements	Image sur un écran et son	Lumières, sons, etc.
Âge	Nouveau-né	2 à 6 mois	3 à 5 mois	6 à 8 mois	À partir de 6 mois
Exemple	DeCasper et Fifer, 1980	Rovee-Collier et al., 1980	Rochat et Morgan, 1995	Wang et al., 2012	Kenward, 2010

Tableau I.2 – Exemples de méthodes de conditionnement opérant utilisées chez le nourrisson.



Figure I.2 – Paradigme du mobile (à partir de Heathcock et al., 2005).

Exploitation de la sensibilité aux contingences sensorimotrices comme mécanisme d'apprentissage chez le bébé Le rôle central de la sensibilité aux contingences sensorimotrices dans le développement du bébé a été défendu à travers plusieurs théories en psychologie du développement. Nous en présentons ici quelques-unes. L'exemple le plus parlant est l'hypothèse d'un « module de détection des contingences » avancée par Watson et Gergely (Gergely & Watson, 1996, 1999). Adoptant une vision modulaire de la cognition, les auteurs défendent que les bébés possèdent dès le début du développement un module consacré à la détection de contingences, dont la fonction serait de sous-tendre l'acquisition du soi corporel (*bodily self*) et le développement d'une conscience de soi émotionnelle (*emotional self-awareness*). Un autre exemple est donné par les travaux de Tarabulsky et al. (1996), dans lesquels les auteurs suggèrent que la capacité des bébés à détecter les contingences et plus particulièrement les contingences sensorimotrices impliquant les partenaires sociaux, joue un rôle essentiel dans le développement socio-émotionnel. Le rôle de la sensibilité aux contingences sensorimotrices dans le développement du bébé a aussi été défendu par Rochat et ses collaboratrices (Rochat, 2001; Rochat & Goubet, 2000; Rochat & Striano, 2000), qui proposent son implication dans le développement d'un sens du corps situé, différencié, organisé et pouvant être utilisé pour agir dans l'environnement, ainsi que dans le développement social, et plus précisément dans l'acquisition d'un sens de la réciprocité avec autrui et d'un sens de la participation avec autrui. Un autre exemple de travail théorique proposant la sensibilité aux contingences sensorimotrices comme moteur du développement est le modèle avancé par Northrup (2016), dont

l'objectif est d'expliquer le développement social typique et atypique du bébé.

En outre des références explicites que nous venons de présenter, nous trouvons dans la littérature en psychologie de nombreux usages implicites du rôle de la sensibilité aux contingences sensorimotrices dans le développement du bébé. Nous en présentons quelques exemples dans le paragraphe suivant. Une première illustration de référence implicite peut être dégagée des théories classiques telles que le constructivisme de Piaget (1936), selon lequel le bébé durant la « période sensorimotrice » (de 0 à 2 ans) structure le monde qui l'entoure par son action, ou la théorie des affordances appliquée au développement par E. J. Gibson (voir Gibson & Pick, 2000), suggérant que le bébé apprend à percevoir des affordances dans son environnement, c'est-à-dire des manières d'interagir avec celui-ci. Des théories plus récentes s'appuient de manière implicite sur l'exploitation de la sensibilité aux contingences sensorimotrices comme mécanisme d'apprentissage, dont la théorie des systèmes dynamiques (Thelen & Smith, 1994), qui pense le développement non pas comme celui d'un individu mais celui d'un « système complexe » composé d'un individu incarné dans un corps et interagissant avec un environnement. Un autre exemple est celui des modèles probabilistes — par exemple, la théorie du « *statistical learning* » (voir par ex. Saffran & Kirkham, 2018, pour une revue de la littérature) ou celle du « cerveau bayésien » (voir par ex. Gopnik & Bonawitz, 2015, pour une revue de la littérature) — selon lesquels le cerveau fonctionne de manière probabiliste et crée un modèle de l'environnement basé sur les régularités des expériences sensorielles et sensorimotrices.

L'exploitation de la sensibilité aux contingences sensorimotrices comme mécanisme d'apprentissage ne s'illustre pas uniquement dans les théories liées au développement cognitif et moteur, mais aussi dans des théories concernant le développement social de l'individu. Ce mécanisme est par exemple implicitement en jeu dans la théorie de l'intersubjectivité de C. Trevarthen (Trevarthen, 1979), théorie qui suggère que le nouveau-né est de manière innée un être social qui s'engage dans des conversations contingentes avec ses partenaires sociaux, ou la théorie de l'attachement développée par Bowlby et Ainsworth (Ainsworth et al., 1978), selon laquelle la responsivité des partenaires sociaux, à laquelle le bébé est sensible, détermine le développement socio-émotionnel de l'individu, ou encore les modèles sociaux de l'apprentissage du langage (voir par ex. Goldstein & Schwade, 2008; Gros-Louis et al., 2006), qui supposent que l'acquisition du vocabulaire est favorisée par des interactions contingentes avec les tuteurs d'apprentissage.

L'exploitation de la sensibilité aux contingences sensorimotrices a aussi été implicitement ou explicitement mentionnée afin d'expliquer des troubles neuro-développementaux, et plus précisément le trouble du spectre de l'autisme (voir par ex. Gergely & Watson, 1996, 1999; Nadel et al., 2005; Northrup, 2016). Nous ne détaillerons pas cette littérature ici puisque ce n'est pas l'objet de cette thèse, mais l'une des hypothèses avancées serait que les individus présentant des troubles du spectre de l'autisme possèdent une exploitation différente de leur sensibilité aux contingences

sensorimotrices, se caractérisant par un manque d'intérêt pour les contingences sociales (Gergely & Watson, 1996, 1999). Une autre hypothèse (Nagai, 2019) suggère que le degré de tolérance aux erreurs de prédiction des conséquences d'une action serait différent chez les personnes atteintes de troubles du spectre de l'autisme, avec une tolérance soit plus grande (qui expliquerait par ex. l'hyposensibilité), soit plus faible (qui expliquerait par ex. l'hypermotilité).

2.2 Motivation intrinsèque

2.2.1 Définition de la motivation intrinsèque

Il est délicat de trouver dans la littérature une définition de la motivation intrinsèque pouvant être commune à la robotique et la psychologie du développement. En effet, le terme de « motivation intrinsèque » est largement employé en robotique, mais moins fréquent en psychologie du développement, où celui de « curiosité » lui est préféré (voir par ex. Kidd & Hayden, 2015). De plus, la définition des deux notions varie d'un domaine à l'autre et à l'intérieur de chaque domaine, faisant que la clarification même de la différence entre les deux termes semble ardue. Il apparaît ainsi préférable de choisir un terme, d'en poser une définition, puis d'explorer en robotique et en psychologie du développement les travaux pouvant en être rapprochés, sans considérer l'étiquette utilisée dans ces travaux. Nous faisons ici le choix d'employer le terme de « motivation intrinsèque », celui-ci étant utilisé par les roboticiens dans les travaux dont nous nous inspirons (voir par ex. Baldassarre, 2011; Cangelosi & Schlesinger, 2015; Oudeyer & Kaplan, 2007). Nous choisissons de définir la motivation intrinsèque comme la réalisation d'une action pour son intérêt propre (« *for its own sake* », Oudeyer & Kaplan, 2007, p. 2), autrement dit pour sa satisfaction inhérente (« *for its inherent satisfactions* », Ryan & Deci, 2000a, p. 56), et non pour la satisfaction d'un besoin physiologique (Baldassarre, 2011) ou l'obtention d'une récompense (Ryan & Deci, 2000a). Nous précisons cette définition dans les sections suivantes en présentant les deux catégories de motivation intrinsèque définies en robotique du développement et leurs applications, ainsi que les différents phénomènes étudiés en psychologie du développement et pouvant être inscrits sous l'étiquette de la motivation intrinsèque. Néanmoins, afin d'offrir au lecteur une meilleure appréhension de ce concept, nous proposons de commencer par une brève présentation historique de l'étude de la motivation intrinsèque (voir Gottlieb et al., 2013; Kidd & Hayden, 2015; Oudeyer et al., 2016, pour des revues de la littérature).

Approche historique de la motivation intrinsèque. William James considérait la curiosité comme l'un des moteurs du comportement humain et l'a définie comme ce qui pousse l'homme à s'intéresser à des situations nouvelles ou à des situations lui permettant de mieux comprendre le monde qui l'entoure (James, 1890). Le terme de curiosité a ensuite été utilisé par les behavioristes dans leurs travaux pour désigner les comportements d'orientation de l'animal vers des éléments

nouveaux ou surprenants de son environnement, ce que Pavlov désignait sous le terme de réflexe d'orientation ou réflexe « *what-is-it?* », (Pavlov, 1927). La curiosité est alors considérée par les behavioristes comme un besoin primaire (*drive*) de l'individu qui doit être satisfait, à l'instar de la faim ou de la soif (Pavlov, 1927). Ce point de vue est contredit par les travaux de Harlow (1950), qui défend que les comportements poussés par la curiosité sont différents de ceux poussés par la faim ou la soif, dans le sens où ils ne sont pas motivés par l'obtention d'une récompense extérieure (par ex. de la nourriture ou de l'eau) mais par la manipulation (par ex. d'un dispositif expérimental chez le macaque rhésus, Butler, 1953; Harlow, 1950) ou l'exploration (par ex. d'un labyrinthe chez le rat, Montgomery, 1954). Une seconde opposition au point de vue des behavioristes est avancée par White (1959). Celui-ci défend que l'intérêt pour la nouveauté ne peut pas être comparé aux besoins primaires car il n'est pas « homéostatique » : d'une part, il ne vient pas répondre à une perturbation environnementale ou interne (comme le manque de nourriture ou d'eau) et, d'autre part, il n'est pas satisfait par l'atteinte d'un équilibre (ne plus avoir faim ou soif). Le terme de « motivation intrinsèque » est alors introduit pour distinguer les comportements exploratoires (par ex. la recherche d'information, l'exploration visuelle de l'environnement ou la manipulation) de ceux permettant de satisfaire un besoin physiologique ou d'obtenir une récompense externe (motivation extrinsèque). L'étude de la curiosité a ensuite été profondément marquée par les travaux de Berlyne (1960), dans lesquels il introduit la notion de « *collative variables* ». Les *collative variables* sont les propriétés d'une situation (ou d'un objet) poussant un individu à explorer celle-ci, comme par exemple la nouveauté, la complexité, ou la surprise, et ont en commun de sous-tendre un gain d'information sur l'environnement. Berlyne (1960) émet l'hypothèse que les situations intrinsèquement motivantes pour l'individu sont celles présentant un niveau intermédiaire de ces *collative variables*, ce que Hunt désigne sous le terme d'incongruité optimale (Hunt, 1965). Suite aux travaux de Berlyne, les psychologues ont proposés d'autres facteurs rendant une situation intrinsèquement motivante pour l'individu, telles que la réduction de la dissonance cognitive (Festinger, 1957), la réduction de l'incertitude (Kagan, 1972), la réduction d'un écart de connaissance (*knowledge gap*) (Loewenstein, 1994), la recherche de contrôle (Ryan & Deci, 2000b) ou encore la recherche d'expérience optimale (Csikszentmihalyi, 1991). La motivation intrinsèque a aussi été au cœur de travaux en neurosciences, montrant que les régions cérébrales (noyau caudé et gyrus frontal inférieur) impliquées chez l'adulte dans une tâche permettant au participant d'obtenir des nouvelles informations étaient similaires à celles impliquées dans des tâches permettant au participant d'obtenir un gain matériel (Kang et al., 2009). Les travaux en neurosciences ont aussi révélé que le système dopaminergique, qui est mis en jeu pour la motivation extrinsèque, semble aussi être impliqué pour la motivation intrinsèque (Blanchard et al., 2015; Bromberg-Martin & Hikosaka, 2009).

2.2.2 Utilisation de la motivation intrinsèque en robotique

La motivation intrinsèque est un mécanisme d'apprentissage primordial en robotique du développement. Les roboticiens du développement distinguent deux types de motivation intrinsèque : la motivation intrinsèque basée sur les connaissances (*knowledge-based intrinsic motivation*, notée ensuite KB-IM) et la motivation intrinsèque basée sur les compétences (*competence-based intrinsic motivation*, notée ensuite CB-IM).

Motivation intrinsèque basée sur les connaissances (KB-IM). La KB-IM est basée sur ce que l'agent sait du monde et de son interaction avec le monde. L'agent explore le monde afin d'acquérir de nouvelles connaissances sur les propriétés du monde ou sur la manière dont ses actions peuvent modifier les propriétés du monde. L'agent est alors intrinsèquement motivé à explorer des situations nouvelles et surprenantes, ou des situations offrant du progrès en connaissance. Son utilisation a été faite pour la première fois dans le travail fondateur de Schmidhuber (1991), dans lequel un agent est équipé d'une « curiosité artificielle » qui le pousse à acquérir de nouvelles connaissances. Cette « curiosité artificielle » est alors proportionnelle à une erreur de prédiction (notée ensuite PE pour *prediction error*). Cette PE correspond pour chaque contingence sensorimotrice à la différence entre les conséquences prédites de l'action et les conséquences réelles de cette action. Lorsque pour une contingence donnée l'agent est capable de parfaitement prédire les conséquences de son action — donc lorsque la PE associée est nulle — l'agent n'explore plus cette contingence.

Le problème posé par une implémentation de la motivation intrinsèque comme proportionnelle à la PE est que l'agent peut se retrouver « bloqué » dans l'exploration d'une contingence pour laquelle la PE ne pourra jamais être nulle, par exemple dans le cas des contingences sociales pour lesquelles la réponse du partenaire social ne peut jamais être parfaitement prédite. Une solution proposée est alors de rendre la motivation intrinsèque proportionnelle non pas à la PE mais à l'amélioration de l'erreur de prédiction (notée ensuite PEI pour *prediction error improvement*). Cela signifie que chaque contingence sensorimotrice est associée à une PE, ainsi qu'à une PEI, correspondant à la différence entre la PE au temps t et la PE au temps $t - 1$. Ainsi, plus la PEI est grande, plus l'agent fait de progrès dans sa capacité à prédire les conséquences de son action, à l'inverse plus la PEI est petite, moins l'agent fait de progrès, ce qui peut signifier que l'agent est déjà parfaitement ou presque parfaitement capable de prédire les conséquences de son action et ne progresse plus, ou *a contrario*, que l'agent est incapable de prédire les conséquences de son action et ne progresse pas dans son apprentissage.

L'implémentation de la motivation intrinsèque comme proportionnelle à la PEI a été améliorée par les travaux fondateurs d'Oudeyer et collègues (Oudeyer et al., 2007), pour lesquels l'espace sensorimoteur est séparé en sous-espaces regroupant des expériences sensorimotrices similaires.

Ces sous-espaces sensorimoteurs sont déterminés par l'agent au fur et à mesure de son exploration de l'environnement par le regroupement de contingences sensorimotrices proches formant ainsi des « situations d'apprentissage », par exemple « bouger un membre » ou « attraper un objet ». Chaque sous-espace sensorimoteur possède alors son propre « expert », œuvrant au calcul des PEI au sein du sous-espace. Ainsi, dans l'exemple précédent des deux sous-espaces « bouger un membre » et « attraper un objet », les contingences sensorimotrices regroupées au sein du sous-espace « bouger un membre » possèdent chacune leur PEI et sont mises en compétition lors de l'exploration de ce sous-espace, mais ne sont pas mises en compétition avec les contingences sensorimotrices du sous-espace « attraper un objet ». Cette implémentation de la motivation intrinsèque est très efficace et permet l'émergence de trajectoires développementales. L'agent débute son apprentissage par une phase de babillage moteur durant laquelle il réalise des mouvements de manière aléatoire, ce qui lui permet de découper l'espace sensori-moteur en différentes situations d'apprentissage. L'agent va ensuite se concentrer sur les situations d'apprentissage lui offrant le plus de progrès dans ses prédictions, ce qui correspond à des situations d'apprentissage ni trop simples ni trop complexes. Une telle organisation de l'exploration de l'environnement fait émerger des « niches de progrès », c'est-à-dire des étapes de développement durant lesquelles l'agent est focalisé sur une situation d'apprentissage. Ces « niches de progrès » se succèdent dans le temps en fonction de leur complexité. Ainsi, dans notre exemple précédent, l'agent se focaliserait dans un premier temps sur la situation d'apprentissage « bouger un membre », celle-ci lui permettant de réaliser rapidement des progrès dans ses prédictions, puis abandonnerait cette situation d'apprentissage lorsqu'il la « maîtriserait » pour passer à la situation d'apprentissage « attraper un objet », celle-ci offrant des progrès en prédiction plus lents car les conséquences de l'interaction avec un objet sont moins prédictibles que celles des mouvements du corps.

Motivation intrinsèque basée sur les compétences (CB-IM). La CB-IM est basée sur ce que l'agent sait faire et plus précisément sur sa capacité à atteindre un but (c'est-à-dire un état du monde). Nous désignons par la suite ces situations dans lesquelles l'agent cherche à atteindre un but par le terme de « situations d'apprentissage ». L'agent est alors intrinsèquement motivé à explorer les situations d'apprentissage lui offrant le meilleur progrès dans la capacité à atteindre le but fixé, ce qui lui permet de développer de nouvelles compétences motrices. Ainsi, à l'inverse des travaux présentés précédemment, la CB-IM n'utilise pas le progrès en connaissance de l'agent comme guide de l'apprentissage, mais le progrès en compétence de l'agent. L'avantage de cette approche est qu'elle permet de résoudre les problèmes posés par la phase de babillage moteur évoquée précédemment. En effet, durant cette phase, l'agent réalise des actions au hasard afin de découper son espace sensorimoteur en sous-espaces. L'agent pouvant réaliser un très grand nombre d'actions différentes, cette phase de babillage moteur peut être extrêmement longue avant que le découpage obtenu ne permette à l'agent d'entrer dans une phase d'apprentissage. Dans le cas de

la CB-IM, la phase de babillage moteur est remplacée par une phase de « babillage de buts » (*goal babbling*), durant laquelle l’agent sélectionne des buts de manière aléatoire afin de découper un « espace de buts » en différents buts à atteindre (voir par ex. Rolf et al., 2010). Cet espace de buts ne représente plus la correspondance entre une sortie motrice et une entrée sensorielle comme cela était le cas pour l’espace sensorimoteur, mais représente la correspondance entre une compétence et une position du corps du robot à atteindre (voir par ex. Baranes & Oudeyer, 2013; Oudeyer et al., 2013) ou un état du monde à atteindre (voir par ex. Santucci et al., 2014b). Suite à cette phase de babillage de buts, l’apprentissage est permis par la répétition des étapes suivantes: (i) la sélection du but à atteindre (position du corps ou état du monde), (ii) la réalisation de l’action associée à ce but, (iii) le calcul de la PEI et (iv) l’actualisation de la correspondance compétence-but et de la PEI y étant associée.

Une différence notable entre ces deux types de motivation intrinsèque (CB-IM et KB-IM) réside dans l’exploitation de la sensibilité aux contingences sensorimotrices qu’ils requièrent. La KB-IM suppose que l’agent utilise un modèle prospectif (*forward model*) : l’exploration intrinsèquement motivée de l’espace sensorimoteur s’appuie sur la capacité de l’agent à prédire les conséquences de ses actions et met ainsi en jeu le modèle $action \rightarrow stimulation\ sensorielle\ prédite$. Au contraire, la CB-IM requiert que l’agent utilise un modèle inverse (*inverse model*) : l’agent doit être capable en partant d’un but à atteindre de retrouver l’action qui a pour conséquence l’accomplissement de ce but. Le modèle mis en jeu est alors le suivant : $action \leftarrow stimulation\ sensorielle\ désirée$.

2.2.3 Références à la motivation intrinsèque en psychologie du développement

Cette section présente premièrement des preuves de motivation intrinsèque (telle que précédemment définie) chez le bébé, à travers l’étude des comportements d’exploration de celui-ci. Nous décrivons ici quatre moteurs d’exploration pouvant être rattachés à la notion de motivation intrinsèque : l’intérêt pour la nouveauté, l’intérêt pour la complexité, l’intérêt pour l’inattendu et l’intérêt pour le contrôle. Il convient de noter que nous ne séparons pas ces quatre moteurs d’exploration selon les deux types de motivation intrinsèque définis par les roboticiens (voir ci-dessus) : il apparaît en effet impossible (en l’état actuel des recherches) d’assurer que la motivation intrinsèque existe selon ces deux formes distinctes chez le bébé. Néanmoins, l’intérêt pour la nouveauté, l’intérêt pour la complexité et l’intérêt pour l’inattendu peuvent être rapprochés de la motivation intrinsèque basée sur les connaissances (KB-IM), et l’intérêt du bébé pour le contrôle peut être associé à la motivation intrinsèque basée sur les compétences (CB-IM). Dans une se-conde partie, nous présentons des travaux expérimentaux et théoriques suggérant que la motivation intrinsèque serait un mécanisme d’apprentissage en jeu dans le développement du bébé. Pour rappel, les travaux présentés ci-dessous ne font toujours pas appel de manière explicite à la

notion de motivation intrinsèque (ni même à celle de la curiosité).

Preuves de motivation intrinsèque chez le bébé. Des preuves de motivation intrinsèque chez le bébé s'observent à travers le phénomène de *neophilia*, c'est-à-dire l'intérêt des bébés pour la nouveauté (Fantz, 1964; Sokolov, 1963). Cet intérêt des bébés pour la nouveauté est très bien documenté en psychologie du développement. Celui-ci a par exemple été montré par l'utilisation du paradigme d'habituation, consistant à habituer des bébés à un stimulus puis à leur présenter un nouveau stimulus (voir par ex. Colombo & Mitchell, 2009, pour une revue de la littérature sur l'habituation visuelle). Le bébé, s'il est capable de différencier les deux stimuli, présente une augmentation dans son temps de regard lors de la présentation du nouveau stimulus. L'intérêt des bébés pour la nouveauté est aussi mis en jeu dans le paradigme de familiarisation, qui consiste à familiariser le bébé avec une catégorie de stimulus (par ex. des visages d'homme ou des images), puis à présenter au bébé simultanément un item de la même catégorie et un item d'une catégorie différente (par ex. un visage d'homme ou un visage de femme) (voir par ex. Quinn et al., 1993, 2002). Dans cette situation, si le bébé est capable de créer des catégories, il regarde plus longtemps l'item de la nouvelle catégorie. La préférence des bébés pour la nouveauté a aussi été montrée par l'utilisation du paradigme de succion non-nutritive (voir par ex. Siqueland & Delucia, 1969) ou de la procédure d'orientation de préférence (*Head Turn Preference Procedure*) (voir par ex. Kemler Nelson et al., 1995). L'intérêt des bébés pour les stimuli nouveaux a fait l'objet de différentes théories en psychologie du développement, telles que l'hypothèse de la divergence (*discrepancy hypothesis*) selon laquelle les bébés ont une préférence pour ce qui est partiellement mais pas totalement encodé en mémoire, ou celle du niveau optimal de stimulation qui suggère que les bébés possèdent un niveau de stimulation préféré, les stimuli nouveaux étant plus stimulants que les stimuli familiers (voir Haywood & Burke, 1977; Mather, 2013, pour des revues de la littérature). Une autre preuve de motivation intrinsèque chez le bébé apparaît dans la préférence des bébés pour la complexité. Celle-ci se reflète dans l'attention plus soutenue qu'ont les bébés pour les stimuli visuels complexes que pour les stimuli visuels simples ; les bébés semblant s'intéresser à des stimuli visuels de plus en plus complexes au cours du développement (voir Brennan et al., 1966), ou (Haywood & Burke, 1977, pour une revue de la littérature). A nouveau, une hypothèse avancée serait que les bébés aient en fait une préférence pour les stimuli de complexité intermédiaire (voir par ex. Berlyne, 1960; Zelazo et al., 1973). Cette hypothèse est soutenue par les travaux de Kidd et al. (2012), qui ont montré que des bébés âgés de 7 - 8 mois exploraient visuellement plus longtemps des situations de complexité intermédiaire que des situations de complexité faible ou élevée, ce qui correspondait dans leur étude à des séquences visuelles ni trop facilement ni trop difficilement prédictibles. Ces résultats ont été répliqués par leur équipe pour des stimuli auditifs (Kidd et al., 2014) et au niveau individuel (Piantadosi et al., 2014). La preuve de motivation intrinsèque chez le bébé s'illustre aussi par l'intérêt des bébés pour ce qui est inattendu, intérêt qui a été étudié par les

psychologues du développement grâce au paradigme de « transgression des attentes » (*violation of expectancies*), qui consiste à présenter une situation impossible, improbable ou inattendue au bébé (voir par ex. Baillargeon et al., 1985; Onishi, 2005; Teglas et al., 2007). Ainsi, dans le cas où le bébé possède des attentes, celui-ci présente des temps de regard plus long pour la situation transgressant ses attentes que pour la situation qui ne les transgresse pas. L'intérêt d'exercer un contrôle sur le monde est lui aussi une marque de motivation intrinsèque chez le bébé. Cet intérêt a été mis en lumière par l'utilisation du conditionnement opérant (voir Tableau I.2 et Tableau I.2). Ainsi, plusieurs auteurs ont rapporté que des jeunes bébés montraient des signes de contentement lorsqu'ils arrivaient à contrôler un élément de leur environnement grâce à leurs actions (voir par ex. Lewis et al., 1985; Sullivan et al., 1979; Watson, 1972) — ces signes de satisfaction n'ayant pas été observés chez des bébés testés dans une situation contrôle, ils ne peuvent pas être expliqués par la simple satisfaction de percevoir une stimulation plaisante. De plus, il a été rapporté qu'à l'arrêt de la contingence, certains bébés montraient des signes de frustration, suggérant une insatisfaction causée par la perte de contrôle sur l'environnement (voir par ex. Fagen & Ohr, 1985; Lewis et al., 1990).

Motivation intrinsèque comme mécanisme d'apprentissage chez le bébé. Comme nous l'avons précisé ci-dessus, le terme de motivation intrinsèque n'est que rarement utilisé en psychologie du développement, et il serait peu concluant de chercher des exemples de son emploi en ces termes en tant que mécanisme d'apprentissage chez le bébé. Néanmoins, nous pouvons aisément établir des parallèles entre ce que nous définissons comme la motivation intrinsèque et les travaux consacrés à l'exploration et au jeu chez le bébé, comportements qui sont considérés depuis longtemps comme des moteurs essentiels de l'apprentissage durant la petite enfance (voir Berlyne, 1960; Bruner et al., 1976; Piaget, 1936). C'est par exemple le cas dans la théorie du développement proposée Piaget (1936), selon laquelle l'enfant explore son environnement tel « un petit scientifique » et récolte par son action de nouvelles informations sur le monde et sur l'interaction qu'il peut avoir avec le monde, ce qui lui permet de construire ses connaissances. De manière générale, le rôle de l'exploration et du jeu dans le développement du bébé semble désormais communément admis par les chercheurs, et cela aussi bien pour le développement moteur (voir par ex. Adolph et al., 2000; Corbetta et al., 2018) que cognitif ou socio-émotionnel du bébé (par ex. Power, 2000; Singer et al., 2006). Cependant, malgré l'importance donnée à l'exploration et au jeu dans le développement du bébé, leur étude est restée durant longtemps plus théorique qu'expérimentale, ne permettant pas d'opérationnaliser leur statut de mécanisme d'apprentissage (voir Kidd & Hayden, 2015). Nous observons toutefois ces quinze dernières années une augmentation du nombre de travaux expérimentaux sur le sujet — ce qui est sûrement en lien avec l'intérêt croissant des roboticiens pour la motivation intrinsèque — dont nous présentons quelques exemples ci-dessous.

Des travaux récents offrent ainsi de mieux comprendre le rôle de l'intérêt pour la nouveauté

et de l'intérêt pour l'inattendu comme moteurs d'apprentissage. Il a par exemple été observé que l'apprentissage d'une nouvelle catégorie d'objets chez des bébés âgés de 10 mois (Mather & Plunkett, 2011) ou d'un nouveau mot chez des bébés âgés de 2 ans (Twomey et al., 2014) était augmenté par une maximisation de la variabilité entre les items présentés aux bébés. Cette amélioration des capacités d'apprentissage pourrait, entre autres, être sous-tendue par une attention soutenue des bébés lors de la présentation d'items très différents les uns des autres, reflet de leur intérêt pour la nouveauté (Mather, 2013; Twomey & Westermann, 2018). Concernant l'intérêt des bébés pour l'inattendu, Stahl & Feigenson (2015) ont observé que des bébés âgés de 11 mois présentaient un meilleur apprentissage des propriétés d'objets ayant précédemment montré un comportement inattendu (la transgression d'une loi physique, comme par ex. traverser un mur) que d'objets ayant montré un comportement attendu. De plus, les bébés présentaient une manipulation plus longue et en lien avec la loi physique transgressée des objets au comportement inattendu (par ex. frapper contre une table un objet ayant précédemment traversé un mur). Sim & Xu (2017) ont rapporté des résultats similaires : dans leur étude, des bébés âgés de 13 mois exploraient préférentiellement des objets ayant été préalablement impliqués dans une situation peu probable (une boîte de laquelle une même boule a été tirée quatre fois successives lors d'un tirage avec remise parmi six boules différentes) que des objets ayant été impliqués dans une situation attendue. L'intérêt pour l'inattendu comme moteur d'apprentissage a aussi été observé chez des enfants âgés de 3 à 6 ans dans une tâche d'apprentissage d'un nouveau verbe ou d'un nouveau nom (Stahl & Feigenson, 2017). Par ailleurs, une étude menée par Esseily au sein de notre laboratoire (Esseily et al., 2015) suggère que l'occurrence d'une situation surprenante, et plus particulièrement d'une situation considérée comme humoristique par le bébé, pourrait améliorer la capacité de bébés âgés de 18 mois à apprendre à utiliser un râteau lors d'un apprentissage par démonstration. En effet, les auteurs rapportent que tous les bébés ayant ri durant la démonstration montraient un apprentissage, alors que seuls 30% des bébés n'ayant pas ri présentaient un apprentissage, ce qui correspond au taux d'apprentissage observé chez les bébés ayant assisté à une démonstration sans élément humoristique.

Des travaux expérimentaux récents semblent aussi confirmer qu'une exploration auto-organisée de l'environnement par le bébé ou le jeune enfant facilite l'apprentissage. De telles preuves ont par exemple été avancées en ce qui concerne l'acquisition des lois causales (Bonawitz et al., 2012; Cook et al., 2011; Gopnik & Schulz, 2007; Schulz & Bonawitz, 2007). Par exemple, Schulz & Bonawitz (2007) ont montré que des enfants d'âge préscolaire préféraient explorer un jouet dont le fonctionnement avait au préalable été ambigu plutôt qu'un nouveau jouet (l'ambiguïté portant sur le levier devant être actionné pour illuminer le jouet) et exploraient ce jouet de sorte à lever l'ambiguïté sur son fonctionnement (en manipulant les leviers l'un après l'autre). L'apprentissage actif des bébés ne se limite pas à l'acquisition des lois causales, les bébés semblent en effet capables d'organiser

leur exploration de l'environnement de manière à maximiser leur apprentissage dans des situations très diverses. Il a par exemple été observé que des bébés âgés de 16 mois montraient un meilleur apprentissage dans une tâche d'imitation d'une nouvelle action lorsqu'ils pouvaient choisir l'objet de cet apprentissage que lorsqu'ils ne le pouvaient pas (Begus et al., 2014), que des bébés âgés de 17 mois étaient plus attentifs à des situations leur permettant un progrès en apprentissage (ici l'apprentissage d'une nouvelle grammaire) qu'à des situations n'offrant aucun apprentissage (Gerken et al., 2011), ou encore que des bébés âgés de 20 mois demandaient de l'aide à un partenaire social lorsque cela leur permettait d'accéder à une information qu'ils ne possédaient pas pour résoudre un problème (ici, retrouver l'emplacement d'un objet caché) (Goupil et al., 2016, voir aussi Begus & Southgate, 2012, sur le rôle du pointage dans l'acquisition d'informations chez le bébé).

2.3 Conclusion

À travers le prisme de la robotique, nous avons proposé de définir l'exploitation de la sensibilité aux contingences sensorimotrices et la motivation intrinsèque comme deux mécanismes d'apprentissage au cœur du développement. Nous avons alors mis en lumière des preuves implicites et explicites de l'existence de ces deux mécanismes chez le bébé, et de leur rôle dans le développement de celui-ci. Ainsi, sous l'hypothèse que ces mécanismes existent chez le bébé, nous proposons maintenant de comprendre en quelle mesure ils pourraient être impliqués dans le développement de l'utilisation appropriée et différenciée du corps, que nous appelons le « savoir-faire corporel ».

3 Développement du savoir-faire corporel

L'objectif de cette thèse a été de comprendre comment le bébé apprend au cours des premiers mois de sa vie à utiliser son corps de manière appropriée et différenciée pour interagir avec son environnement, ce que nous appelons le « savoir-faire corporel ». Nous présentons premièrement une définition de cette notion, puis nous cherchons à appréhender son développement à travers les deux mécanismes d'apprentissage que nous avons précédemment décrits.

3.1 Définition du savoir-faire corporel

Le développement corporel du bébé a été largement étudié en psychologie du développement et cela sous différentes étiquettes telles que le schéma corporel (par ex. Gallagher et al., 1998), le sens de l'agentivité (par ex. Verschoor & Hommel, 2017), la connaissance implicite de soi (par ex. Neisser, 1991), la connaissance du corps (par ex. Rochat & Goubet, 2000), la conscience de soi (par ex. Gergely & Watson, 1996; Rochat, 2003), la conscience du corps (par ex. Filippetti et al., 2015a), le sens du corps propre (par ex. Rochat & Striano, 2000), la représentation du corps (par

ex. Meltzoff et al., 2018), l'intentionnalité des actions (voir par ex. Biro & Hommel, 2007), etc. Nous choisissons ici d'introduire un terme nouveau, celui de savoir-faire corporel (*body know-how*), que nous définissons comme une utilisation appropriée et différenciée du corps pour interagir avec l'environnement. Nous avons décidé d'employer ce nouveau terme afin de nous affranchir des questions liées aux représentations ou à la conscience du corps (par exemple présentes dans la notion de « schéma corporel », voir de Vignemont (2010)) qui s'avèrent très épineuses à traiter chez le bébé. Nous avons ainsi choisi d'éviter le terme de « connaissance » (comme c'est le cas dans « connaissance corporelle » ou « connaissance procédurale du corps ») et d'opter pour celui de « savoir-faire » afin de mettre en avant l'aspect pratique et non représentationnel de notre objet d'étude. Nous avons aussi voulu employer un nouveau terme afin de pouvoir clairement caractériser notre objet d'étude : l'utilisation appropriée, mais aussi et surtout, différenciée du corps, ou autrement dit la capacité d'un individu à utiliser chacun de ses membres de manière spécifique pour interagir avec son environnement. Cette capacité ne correspond pas seulement à la capacité d'un individu à bouger l'un de ses membres sans bouger les autres — ce qui serait un problème uniquement moteur — mais aussi à la capacité d'un individu à ressentir une stimulation tactile de manière localisée et non globale (par ex. ressentir sur quelle partie du corps se pose un insecte), et à la capacité d'un individu à utiliser un seul de ses membres pour interagir avec son environnement lorsque cela est approprié (par ex. prendre un objet dans un coffre avec un seul bras lorsque l'autre bras sert à maintenir ouvert le couvercle du coffre).

3.2 Rôle de la sensibilité aux contingences sensorimotrices et de la motivation intrinsèque dans le développement du savoir-faire corporel

Quelle est la place jouée par les deux mécanismes d'apprentissage précédemment identifiés dans le développement du savoir-faire corporel ? Nous commençons par une présentation des travaux de robotique sur le sujet, de manière à déterminer dans quelle mesure l'implémentation de ces mécanismes peut sous-tendre le développement du savoir-faire corporel. Nous présentons ensuite les preuves implicites et explicites du rôle de ces mécanismes dans le développement du savoir-faire corporel chez le bébé.

3.2.1 Travaux en robotique du développement

Le développement du savoir-faire corporel est au cœur de nombreux travaux en robotique, même si le terme de savoir-faire corporel n'y est pas explicitement employé. En effet, un des défis des roboticiens est de créer des robots capables d'apprendre à utiliser leurs corps de manière appropriée et différenciée pour interagir avec l'environnement. Une illustration éclairante est donnée par la « Playground Experiment » (Oudeyer et al., 2007) dans laquelle le robot-chien AIBO ne possède au début de la session d'apprentissage aucun savoir-faire corporel, puis devient progres-

sivement capable d’interagir avec son environnement, au départ de manière peu appropriée (par ex. mordant le jouet à frapper), puis de manière appropriée et différenciée, en utilisant la bonne action pour interagir avec chaque élément de son environnement. Une seconde illustration est offerte par le modèle d’agent simulé développé par [Mannella et al. \(2018\)](#), qui apprend au fur et à mesure d’une session d’apprentissage à utiliser ses bras de manière appropriée et différenciée pour toucher des parties de son corps (*self touch*) — cette expérience est une modélisation d’une étude sur le développement du savoir-faire corporel chez le bébé menée par Somogyi au sein de notre laboratoire ([Somogyi et al., 2018](#)). De très nombreux autres exemples existent dans la littérature robotique, dans lesquels l’agent apprend par exemple à toucher une balle (par ex. [Santucci et al., 2014b](#)), attraper un objet (par ex. [Natale et al., 2005](#)) ou encore utiliser un outil (par ex. [Forestier & Oudeyer, 2017](#)). Ce développement du savoir-faire corporel chez des agents simulés ou incarnés est sous-tendu par l’implémentation d’algorithmes d’apprentissage basés sur l’exploitation de la sensibilité aux contingences sensorimotrices et sur la motivation intrinsèque (voir [Section 2.1.2](#) et [Section 2.2.2](#) pour une description de ces algorithmes). C’est plus précisément la motivation intrinsèque basée sur les compétences (CB-IM, voir [Section 2.2.2](#)) qui est mise en jeu. Au fur et à mesure d’une session d’apprentissage, l’agent acquiert des compétences corporelles grâce à l’exploration auto-organisée et intrinsèquement motivée de différentes situations d’apprentissage. L’agent développe ainsi une utilisation appropriée et différenciée de son corps, sans que cela ne fasse appel à des représentations mentales du corps ou à la notion de « connaissance »³.

3.2.2 Travaux en psychologie du développement

Le développement du savoir-faire corporel chez le bébé est détaillé dans le [Chapitre 3](#) de cette thèse à travers une revue de la littérature sur le sujet. Le paragraphe suivant en présente une brève introduction, puis se concentre sur la description du rôle de l’exploitation de la sensibilité aux contingences sensorimotrices et de la motivation intrinsèque dans le développement du savoir-faire corporel.

Les nombreux travaux portant sur l’acquisition de compétences corporelles par le bébé (par ex. [Corbetta et al., 2000](#); [Bourgeois et al., 2005](#); [Rochat et al., 1999](#)) ou sur le développement d’un sens du corps chez le bébé (voir la revue de la littérature de [Rochat & Goubet, 2000](#)) peuvent être rattachés à l’étude du savoir-faire corporel, même si ces travaux ne font pas référence de manière explicite à ce terme. Nous pouvons par exemple appréhender le développement du savoir-

³Il est intéressant de relever ici que les roboticiens du développement se sont aussi intéressés au développement du schéma corporel. Ils ont pour cela créé des robots capables de développer de manière autonome des « cartes corporelles » correspondant à une représentation mentale du corps (voir par ex. [Hoffmann et al., 2010](#); [Schillaci et al., 2016](#), pour des revues). Par exemple, les travaux de [Bongard et al. \(2006\)](#) présentent un agent capable de retrouver de manière autonome l’usage de son corps après la perte de l’un de ses quatre membres grâce à une adaptation de la représentation mentale de son corps. Les travaux de Hoffman et collègues (voir par ex. [Hoffmann et al., 2017](#)) présentent eux un robot iCub apprenant à localiser et atteindre des stimulations tactiles sur son corps grâce à un apprentissage basé sur la formation de ces « cartes corporelles ».

faire corporel du bébé au travers des travaux sur l'acquisition de boucles sensorimotrices (par ex. la coordination main-bouche, [Butterworth & Hopkins, 1988](#)), des travaux sur les réponses motrices du bébé aux stimulations environnementales (par ex. la réalisation de pas face à des flux optiques, [Barbu-Roth et al., 2009](#)), de ceux sur l'acquisition des habiletés manuelles (par ex. le geste de prise, voir les travaux fondateurs de [White et al., 1964](#) ou voir [Fagard, 2001](#), pour une revue de la littérature), ou encore des travaux sur les tâches de moyen-but (*means-end*) (par ex. tirer sur un linge pour obtenir un objet, [Munakata et al., 1997](#); [Willatts, 1999](#)). Parmi ces travaux, certaines théories proposent implicitement ou explicitement l'exploitation de la sensibilité aux contingences sensorimotrices et la motivation intrinsèque comme mécanismes d'apprentissage sous-tendant les trajectoires développementales observées chez le bébé. C'est par exemple le cas du modèle d'acquisition des habiletés manuelles proposé par Corbetta et ses collègues ([Corbetta et al., 2018](#)) ou du modèle de développement sensorimoteur du fœtus et du jeune bébé proposé par Fagard et notre équipe ([Fagard et al., 2018](#)). Dans ces deux modèles, le développement de ce que nous appelons le savoir-faire corporel du bébé est sous-tendu par une première phase de babillage moteur, durant laquelle le bébé réalise des mouvements de manière aléatoire, ce qui l'amène à générer par hasard une stimulation « intéressante » (par ex. la sensation du cordon ombilical sur la main). Le bébé est alors intrinsèquement motivé à ressentir cette sensation à nouveau et cherche ainsi à répéter l'action l'ayant déclenchée, ce qui lui permet d'acquérir de nouvelles compétences corporelles (par ex. le geste d'atteinte).

3.3 Conclusion

Le savoir-faire corporel, que nous définissons comme une utilisation appropriée et différenciée du corps pour interagir de manière efficace avec l'environnement, est un concept se trouvant implicitement au cœur de nombreux travaux en robotique et en psychologie du développement. Les travaux de robotique présentés suggèrent que l'implémentation chez un agent de l'exploitation de la sensibilité aux contingences sensorimotrices et de la motivation intrinsèque permet de sous-tendre chez celui-ci le développement d'un certain savoir-faire corporel. L'analyse de la littérature en psychologie de développement, que nous avons réalisée à travers le prisme des mécanismes proposés par les roboticiens, suggère que ces deux mécanismes pourraient aussi être à l'œuvre dans le développement du savoir-faire corporel du bébé.

4 Conclusion

Les travaux présentés en [Section 2](#) ont permis de montrer le statut central de l'exploitation de la sensibilité aux contingences sensorimotrices et de la motivation intrinsèque en robotique, et ont suggéré (de manière implicite le plus souvent) qu'ils pourraient aussi être à l'œuvre dans le

développement du bébé. Sous l'hypothèse que ces mécanismes existent réellement chez le bébé, nous avons ensuite entrepris d'explorer leur influence dans le développement du savoir-faire corporel. Les études passées en revue en [Section 3](#) ont montré, d'une part, que l'implémentation de ces deux mécanismes avait permis aux roboticiens de créer des agents développant un savoir-faire corporel et, d'autre part, que certaines théories en psychologie du développement semblaient s'appuyer de manière explicite ou implicite sur ces mécanismes afin d'expliquer l'acquisition de certaines compétences corporelles chez le bébé. Le travail de recherche présenté ci-après aspire ainsi à compléter les connaissances présentées ci-dessus, en se concentrant plus précisément sur la sensibilité aux contingences sensorimotrices et son rôle dans le développement du savoir-faire corporel chez le bébé durant la première année de vie.

5 Questions de recherche

Les travaux de recherche réalisés dans le cadre de cette thèse se concentrent sur la sensibilité aux contingences sensorimotrices et son rôle dans le développement du savoir-faire corporel chez le bébé durant la première année de vie. La motivation intrinsèque, le second mécanisme d'apprentissage que nous avons présenté en introduction, ne fait pas l'objet d'une étude spécifique au sein de cette thèse, les difficultés expérimentales rencontrées (voir [Chapitre 5](#)) ayant empêché de mener à bien la totalité des travaux prévus. La motivation intrinsèque reste néanmoins évoquée en filigrane. Les travaux de recherche présentés ci-après peuvent être séparés en deux parties : ceux concernant la sensibilité aux contingences sensorimotrices et ceux concernant le développement du savoir-faire corporel. Les paragraphes ci-dessous offrent une brève introduction des questions de recherche explorées dans chacune de ces parties.

5.1 Sensibilité aux contingences sensorimotrices chez le bébé

Les deux premières questions explorées dans cette thèse ont pour objectif de mieux caractériser la sensibilité aux contingences sensorimotrices chez le bébé et son rôle dans le développement, en proposant pour la seconde question un parallèle avec les travaux menés par les roboticiens.

Quels sont les paramètres qui facilitent ou empêchent la détection d'une contingence chez le bébé âgé de moins d'un an ? Les psychologues du développement ont largement utilisé la sensibilité des bébés aux contingences sensorimotrices en tant que méthodologie expérimentale (via par ex. le conditionnement opérant, voir [Tableau I.1](#) et [Tableau I.2](#)), mais peu d'études se sont consacrées à caractériser précisément cette sensibilité, autrement dit à déterminer les paramètres faisant qu'une contingence soit détectée ou non par un bébé. Ces études n'ont de plus pas fait l'objet d'une revue systématique de la littérature, ce qui renforce le manque de caractérisation

de ce mécanisme d'apprentissage chez le bébé. Ainsi, la première question de recherche explorée dans cette thèse est la suivante : quels sont les paramètres qui facilitent ou empêchent la détection d'une contingence chez le bébé âgé de moins d'un an ? La réponse à cette question est proposée à travers une revue de la littérature sur la sensibilité aux contingences sensorimotrices présentée au [Chapitre 1](#) (article soumis à *Developmental Psychology*) et une étude expérimentale prenant la forme d'une série de douze études pilotes présentée au [Chapitre 5](#) (travaux non soumis à la publication).

Dans quelle mesure l'exploitation de la sensibilité aux contingences sensorimotrices contribue-t-elle au développement ? Les travaux relatifs à la sensibilité aux contingences sensorimotrices chez le bébé étant nombreux et spécifiques à différents aspects du développement, il apparaît difficile d'en tirer des conclusions aisément transposables à la robotique. Ainsi, la deuxième question investiguée dans cette thèse — en quelle mesure l'exploitation de la sensibilité aux contingences sensorimotrices contribue-t-elle au développement ? — est traitée dans une revue de la littérature croisée entre la psychologie et la robotique du développement, réalisée en collaboration avec l'ISTC-CNR. Cette revue de la littérature se concentre plus précisément sur quatre points : la discrimination de l'action ou du membre impliqués dans une contingence sensorimotrice, la mémorisation d'une contingence sensorimotrice, la généralisation d'une contingence sensorimotrice et l'utilisation d'une contingence sensorimotrice dans une action dirigée vers un but. Cette revue de la littérature est présentée au [Chapitre 2](#) (article en révision à *Frontiers in Neurorobotics*).

5.2 Développement du savoir-faire corporel

La seconde partie de cette thèse aspire à augmenter nos connaissances sur le développement du savoir-faire corporel et à mieux comprendre le rôle de la sensibilité aux contingences sensorimotrices dans ce développement.

Comment le savoir-faire corporel se développe-t-il durant la première année de vie du bébé ? Le développement du savoir-faire corporel a fait l'objet de nombreuses études chez le bébé. Cependant, ces travaux n'ayant jusqu'alors été que rarement réunis sous l'étiquette unique d'un domaine d'étude, il apparaît difficile de dégager une vue d'ensemble du développement du savoir-faire corporel chez le bébé. La troisième question explorée dans cette thèse est donc la suivante : comment le savoir-faire corporel se développe-t-il durant la première année de vie du bébé ? La réponse à cette question a été abordée dans la [Section 2](#) du [Chapitre 2](#) (article en révision à *Frontiers in Neurorobotics*). Elle a plus particulièrement fait l'objet d'une revue de la littérature explorant ce que nous considérons comme les trois principaux modes de développement du savoir-faire corporel : l'exploration du corps, l'interaction avec l'environnement physique et

l'interaction avec l'environnement social. Cette revue de la littérature est présentée au [Chapitre 3](#) (article en révision à *Enfance*). Celle-ci a été rédigée en français, afin qu'elle puisse bénéficier aux professionnels de la petite enfance en France (psychologues, éducateurs.trices de jeunes enfants, psychomotricien.ne.s).

Le développement du savoir-faire corporel se réalise-t-il par le passage d'une utilisation indifférenciée (globale) du corps à une utilisation différenciée (locale) ? La facette du savoir-faire corporel la moins documentée en psychologie du développement est l'utilisation différenciée du corps, élément pourtant indispensable au développement du bébé et au perfectionnement de nombreuses compétences motrices, telles que le geste d'atteinte, le geste de prise, le pointage ou la marche. Les rares travaux réalisés sur le sujet (Rovee-Collier et al., 1978; Somogyi et al., 2018; Watanabe & Taga, 2006) suggèrent que le bébé ne présente pas à la naissance une utilisation différenciée de son corps et que celle-ci se développe durant les premiers mois de la vie. Plus précisément, le bébé semble passer d'une utilisation indifférenciée (globale) du corps à une utilisation différenciée (locale) du corps. La dernière question investiguée dans cette thèse est alors la suivante : le développement du savoir-faire corporel se réalise-t-il par le passage d'une utilisation indifférenciée (globale) du corps à une utilisation différenciée (locale) ? La réponse à cette question a été traitée par deux études expérimentales, l'une présentée au [Chapitre 4](#) (article en révision à *British Journal of Developmental Psychology*) et l'autre prenant la forme d'une série de douze études pilotes présentée au [Chapitre 5](#) (travaux non soumis à la publication).

Chapitre 1

Detection of sensorimotor contingencies in infants before the age of one year: a comprehensive review

Soumis à Developmental Psychology (Juin 2019)

Authors. Lisa Jacquey, Jacqueline Fagard, Rana Esseily, and J. Kevin O'Regan

Abstract. In order to benefit from the exploration of their body and their physical and social environment, infants need to detect sensorimotor contingencies linking their actions to sensory feedback. This ability, which seems to be present in babies from birth and even *in utero*, has been widely used by researchers in their study of early development. However, a careful look at the literature, particularly recent literature, suggests that babies may not be uniformly sensitive to all sensorimotor contingencies. This literature review examines in detail the mechanism of sensorimotor contingency detection in infants before the age of one year. Four aspects of sensorimotor contingency detection are considered: characteristics of action and feedback, contingency parameters, exposure conditions, and inter-individual differences. For each topic we highlight what favours and what hinders the detection of sensorimotor contingencies in infants. Our review also demonstrates the limitations of our knowledge about sensorimotor contingency detection. We advocate the importance of making progress in this field at a time when sensorimotor contingency detection is of major interest in developmental robotics and artificial intelligence.

Key words. Infancy; Sensorimotor Learning; Sensorimotor Contingencies; Action-effects; Methodological Issues; Operant Conditioning

1 Introduction

Exploring the body and the environment is obviously essential for infant development: it helps the infant understand the causal structure of the world and to engage socially with other agents; it enables the infant to develop awareness of his/her body, a sense of agency, and self-consciousness. Roboticians have recently also become interested in how infants explore their body and the world around them, since mimicking how babies learn may be a way to develop autonomous agents capable of open-ended learning (see, e.g., [Cangelosi & Schlesinger, 2015](#)). This paper focuses on an underlying ability needed for this exploration to be effective, namely the ability to detect when an action is associated with an outcome — in other words the ability to detect “sensorimotor contingencies”. That babies should be able to detect sensorimotor contingencies is generally taken for granted by developmental psychologists, presumably because this ability is at the basis of operant conditioning, which was used very successfully in the 70’s and 80’s as a tool for studying cognitive functions in infants. The best example is the “mobile paradigm” which has been extensively used in the study of infant memory (see, e.g., [Rovee-Collier, 1999](#), for a review), and where one of the baby’s limbs is attached to a mobile above it in such a way that the baby’s movements activate the mobile. Given this and a plethora of other work based on infants’ ability to detect contingencies (e.g., [DeCasper & Fifer, 1980](#); [Dunham & Dunham, 1990](#); [Rochat & Striano, 1999](#); [Watson, 1972](#)), developmental psychologists have good reason to consider that babies are highly sensitive to sensorimotor contingencies.

However, does this mean that infants are able to detect any contingency? Looking at recent work using operant conditioning and reconsidering earlier work more closely, it seems that infants’ sensitivity to sensorimotor contingencies might be more complex than appears at first sight in the literature. Indeed, in some studies, only a fraction of the observed babies seem to be sensitive to the contingency used by the experimenters. Consider for example the famous “mobile paradigm” developed by Carolyn Rovee-Collier ([Rovee & Rovee, 1969](#)), in which one of the baby’s limbs is connected to a mobile so that the baby’s movements induce “conjugate” movements of the mobile. This paradigm has been used extensively to characterize early development, particularly memory development, with more than fifty studies from Rovee-Collier’s team alone. However, even within these, it appears that some babies did not learn the contingency between their movements and the mobile: e.g., 8% in [Hayne et al. \(1986\)](#) (2-month-old infants), 9% (experiment 1) and 11% (experiment 2) in [Rovee-Collier et al. \(1985\)](#) (3 month-old-infants), or 18% in [Fagen et al. \(1984\)](#) (experiment 2, 3 month-old-infants). The failure of some babies to learn is also (and more clearly) reflected in studies from other teams (using the mobile paradigm or other operant conditioning procedures). This is the case, for example, in [Watanabe & Taga \(2009\)](#) in which only 45% of the 120 babies in the study learned the contingency, or also in the study of [Tiernan & Angulo-Barroso \(2008\)](#) in which only between 30% and 60% of the 8 to 12 infants (depending on the experimental

condition) were able to learn the contingency, or even in [Angulo-Barroso et al. \(2017\)](#) in which only 45% of the 38 infants were sensitive to the contingency. Moreover, it also appears that under certain experimental conditions, babies do not even show any contingency learning at the group level. For example, [Tiernan & Angulo-Barroso \(2008\)](#) obtained no statistical difference between infants tested in contingent situations and infants in a non-contingent control group, or the study of [Floccia et al. \(1997\)](#) in which the authors found that newborns were not sensitive to operant conditioning under certain conditions. Also, it is worth noting that these examples illustrating infants' difficulty to learn sensorimotor contingencies correspond only to published papers. Our personal communication with numerous investigators who have attempted to study sensorimotor contingencies with infants suggests that there have actually been many failures to obtain reliable learning effects, rendering publication of the results impossible.

What does then account for these rejection rates and these difficulties in obtaining reliable results? Are there very significant individual differences between infants? Or are there special characteristics that a contingency must have in order to match the properties of a baby's contingency detection mechanism? Despite an abundance of published studies using operant conditioning, there is to our knowledge no paper systematically reviewing the characteristics of baby's sensitivity to non-social sensorimotor contingencies (contingencies involving the body itself or the external physical world but not the social partners). To investigate this question the present paper will provide an overview of available data about the properties of babies' responsiveness to contingencies in different circumstances. More precisely, we will review the following aspects of the contingency detection mechanism: (1) characteristics of action and feedback, (2) contingency parameters: temporal, relational, spatial, (3) exposure conditions: amount of exposure, time window between two repetitions of the contingency, probability of occurrence, prior exposure, and (4) inter-individual differences: motivation, inter-individual differences. We hope this will help experimenters in future to find contingencies that match infants' sensitivity, thereby increasing the chance of successful experiments.

2 Characteristics of action and feedback

2.1 Action

2.1.1 Saliency of the contingent action

It has been hypothesized that contingencies involving salient actions, i.e., actions that an infant can easily isolate and identify relative to other actions, should be more easily detected by infants ([Zwicker et al., 2012](#)). The saliency of an action, and therefore the infant's ability to identify it as involved in a contingency, depends on several aspects such as its amplitude, its suddenness or its

goal-directedness. For example, with respect to the action's suddenness, Zwicker et al. (2012, p. 30) argued that "*movements that involved a sudden onset and offset would facilitate the participant's ability to detect [the associated contingency], whereas movements that were of a continuous nature with no sudden start or stop would diminish their ability to detect [the associated contingency]*". To our knowledge only Watson (1979) has tested the influence of an action's saliency on the detection of sensorimotor contingencies. In his experiment, 2-month-old infants' foot pressure on a pillow triggered movements of a mobile above their heads. Infants were divided into two groups depending on the sensitivity of the pillow: one group had a very sensitive pillow (a low foot pressure was sufficient to trigger the feedback) and one group had a pillow that was half as sensitive (a high foot pressure was needed to trigger the feedback). Watson (1979) found that infants exposed to the less sensitive pillow learnt more rapidly compared to infants exposed to the more sensitive pillow. A plausible interpretation of the result is that the observed enhancement of learning is due to the saliency of the contingent action. However, it is worth noting that, as actually suggested by Watson in his article, the explanation could be that infants prefer "less-than-perfect" contingencies to "perfect" contingencies. We will come back to this issue in the Section 4.3. Though it would seem natural to expect that increased action saliency should improve detectability of contingencies, the literature generally only provides anecdotal evidence. For example, Millar & Watson (1979, p. 748) reported having ensured "*that relatively extensive arm movement was required to operate the [contingent feedback]*". Finkelstein & Ramey (1977, p. 810) explained that they preferred to use a panel-pressing action rather than an arm-pulling action because "*it was less susceptible to unintentional responding*". Our personal communication with workers in the field also confirms that they deliberately choose salient contingent actions in order to increase the detectability of the contingencies in their experiments, for example by using an action with a well marked start or end (e.g., pressing a button). Nevertheless, it seems that diminished saliency of actions does not completely prevent contingency detection: Maister et al. (2017) found that 5-month-old infants were able to detect a contingency between their heartbeats (a non-salient and non-intentional action) and movements of a character on a screen.

2.1.2 Proficiency in executing the contingent action

Another feature of an action that might improve its identification among other motor commands, and so enhance the detection of the associated contingency, is the infant's proficiency in executing this action. One might argue that infants might be more apt to identify actions that they have already mastered, as claimed for instance by Rochat & Striano (2000, p. 527) who noticed that operant conditioning was feasible in newborns only when an "*already well organized and preadapted action*" was reinforced (here non-nutritive sucking). Thus, probably based on this statement, developmental psychologists seem to have carefully chosen the contingent actions used in their

experiments so as to consider the motor abilities of the infants at the tested age. For example, the most frequently used paradigm with newborns is non-nutritive sucking because at this age sucking is one of the only actions that infants have already mastered. This paradigm is then generally abandoned by researchers working with older infants as older infants do not tend to suck anymore and prefer to interact manually with objects or to interact socially with agents. Another example is given by the extensive use of the mobile paradigm in 3-month-old babies, where the contingent action involved is babies' kicking when lying on their backs. Why choosing this action over another one? This choice seems to be justified by the good kicking control possessed by babies of this age, while their control of arm movements is much more limited. In older babies — who no longer tend to kick so much in a supine position — the mobile paradigm is abandoned: see for example [Hartshorn & Rovee-Collier \(1997\)](#) in which the authors explicitly explain that they had to switch to another task with babies older than 6 months of age; or see [Watanabe & Taga \(2006, p. 403\)](#), in which the authors adapted to the current skills of older babies by using reinforcement of arm movements, saying that “*as infants grow, it becomes apparent that the arms are more frequently used for manipulatory behaviors while the legs are involved with posture and locomotion*”. Nevertheless, it is worth noting that no experiment has come to our attention that directly compares contingency detection between more or less proficient actions.

2.1.3 Conclusion

Contingency detection seems to be enhanced by salient actions such as high amplitude sucking or very sudden arm movements. Hence, actions that are noticeable among other motor commands, as actions with a clear beginning and end (e.g., when pressing a button), seem beneficial for contingency detection as they ensure that the infant can easily determine which action is the one causing the effect.

In addition, for contingent situations to be easily detected by an infant, the contingent action must be adapted to the infant's motor abilities. The degree to which it is adapted will depend strongly on the infant's age: on the one hand, the action should preferably be in the infant's motor repertoire (e.g., non-nutritive sucking in newborns) and, on the other hand, it must correspond to the infant's spontaneous motor behaviour at its particular period of development (e.g., object manipulation between 6 and 9 months).

2.2 Feedback

A second factor that obviously influences the baby's ability to detect a contingency is the accompanying contingent feedback. In this section we explore how babies' sensitivity to contingencies is affected by the sensory modalities of the feedback and its attractiveness to the baby.

2.2.1 Sensory modalities

One might ask to what extent the sensory modality of the contingent feedback influences contingency detection in infants. To our knowledge, three studies have investigated this question (McKirdy & Rovee, 1978; Kraebel et al., 2004; Tiernan & Angulo-Barroso, 2008). In these studies, 3-month-old infants were assigned to three groups, each exposed to a contingency involving their leg movements, but with feedback from different sensory modalities: visual feedback (a silent and visible mobile), auditory feedback (a noisy but out of sight mobile), or audiovisual feedback (a noisy and visible mobile). Babies in each group were exposed to the same procedure: first, a baseline during which the baby's movements are measured in the absence of contingency, then a phase of exposure to the contingency (acquisition phase), immediately followed by stopping of the contingency (extinction phase) and followed, 24 hours later, by a re-exposure to the contingency (retention phase). In the three studies, the authors found that all groups were able to learn the contingency regardless of the feedback they were exposed to (visual, auditory and audiovisual) — the “learning criterion” consisting in a higher kicking rate during the acquisition phase than the one observed in the baseline. However, the authors found slightly diverging results between the visual, auditory and audiovisual groups. McKirdy & Rovee (1978) found that all feedback groups showed similar kicking rates in the acquisition phase, but that in the extinction phase (when the contingent feedback was removed) the infants exposed to the auditory feedback reacted differently compared to the other groups (visual and audiovisual feedback). Infants in the auditory group diminished their kicking rate while infants in the visual and audiovisual groups maintained their kicking rate at a level similar to the rate in the acquisition phase. The difference in behaviour in the extinction phase might be explained by the difference in stimulation during this phase: infants in the visual and audiovisual groups were exposed to a non-moving mobile while the infants in the auditory groups received no stimulation at all (since during the extinction phase the mobile was not visible in this group and no sound was displayed). Kraebel et al. (2004) found that all the groups (visual, auditory or audiovisual) showed similar kicking rates in the acquisition phase, but that infants in the audiovisual group had a higher kicking rate in the retention phase compared to infants in the unimodal groups (visual or auditory). Tiernan & Angulo-Barroso (2008) found that infants exposed to audiovisual feedback showed a higher kicking rate compared to infants exposed to unimodal feedback (visual or auditory). They found no difference in kicking rates between the two types of unimodal feedback (visual and auditory). It is worth noting that this enhancement of learning using audiovisual feedback was also noticed by McKirdy & Rovee (1978): in their experiment, infants exposed to the audiovisual feedback had higher kicking rate in the acquisition phase than infants in the unimodal groups (visual and auditory) but these differences did not reach statistical significance. Altogether the results of these three studies suggest that the sensory richness of feedback might improve contingency learning in infants since the use of

combined audiovisual stimulation as compared to visual or auditory stimulation seems to facilitate the detection of a contingency and to enhance its long-term retention.

2.2.2 Attractiveness of the feedback

A second feature of the feedback that might influence contingency detection is the attractiveness of the feedback for the infant. First of all, it is worth noting that the simple fact of producing an effect, whatever it is, is attractive to babies (we will come back to this notion in the [Section 5.1](#)). In addition, it seems obvious that an infant should be more likely to detect a contingency if the infant is highly attracted by the feedback involved in this contingency. The attractiveness of the feedback can be defined along two dimensions, (i) the baby's interest in the stimulus itself, and (ii) the baby's interest in the way the stimulus is presented (i.e., with or without variation). To our knowledge, developmental psychologists have not attempted to assess babies' ability to detect contingencies according to the first dimension — experimenters have simply used stimuli that are known to be of high interest for infants: their own mother's voice (e.g., in [van der Meer & van der Weel, 2011](#)), happy infant faces (e.g., in [Lewis et al., 1985](#)), infant toys (e.g., mobile, train in [Hartshorn et al., 1998](#)), social interactions with the experimenter (e.g., in [Ramey & Ourth, 1971](#)), infant movies (e.g., in [Kenward, 2010](#)), infant songs (e.g., in [Kraebel et al., 2004](#)), colored lights (e.g., in [Millar, 1972](#)), animal pictures (e.g., in [Wang et al., 2012](#)), etc. Concerning the second dimension of stimulus attractiveness (i.e., the way the stimulus is presented), [Siqueland & Delucia \(1969\)](#) found a positive influence of variation in feedback on infants' contingency learning. They exposed 12-month-old infants to a contingency between their sucking and the appearance of visual stimuli and found that infants exposed to redundant stimuli responded to the contingent situation for a shorter time compared to infants tested with non-redundant stimuli. This finding can be compared with the effects observed in studies using the habituation paradigm (see, e.g., [Aslin, 2007](#), for a recent review on visual habituation). Even though developmental psychologists do not generally explicitly justify their choice of contingent feedback, the observations above suggest that the attractiveness of the feedback plays a role in the propensity of an infant to detect a sensorimotor contingency.

2.2.3 Conclusion

With regard to feedback, richer stimuli seem to favour contingency detection, i.e., those involving several sensory modalities and that vary during the experiment. Stimuli that are pleasant and of high interest for the baby given his/her age (e.g., the mother's voice or heartbeats in newborns) may also enhance contingency detection.

3 Contingency parameters

3.1 Temporal parameters

From the very first months of life, infants are able to distinguish small differences in temporal duration and temporal sequences (see, e.g., [Lewkowicz, 1989](#), for a review). The time interval between an action and a subsequent perceptual change can therefore presumably be used by the infant’s brain as an indication of a contingent link between two events. Following this hypothesis, developmental psychologists have studied how infants’ sensitivity to contingencies depends on temporal delays. They have done this for contingencies involving the physical environment, the social environment and feedback of the baby’s own movements. In a first paragraph, we will attempt to determine what delay separates situations considered by infants as contingent from those considered as non-contingent.

3.1.1 Contingent or Non-contingent?

Infants are able to differentiate between contingent and non-contingent situations, both in terms of interaction with the physical environment (e.g., [Wang et al., 2012](#)) and with the social environment (e.g., [Murray & Trevarthen, 1985](#); [Nadel et al., 1999](#)). This raises the question of when babies consider a situation to be non-contingent, or more precisely for what delay between the action and feedback? It seems that when delays are longer than 3 seconds, infants are no longer able to detect sensorimotor contingencies. [Ramey & Ourth \(1971\)](#) exposed 3-, 6- and 9-month-old infants to a sensorimotor contingency between their vocalizations and a multisensory response of the experimenter. At each age infants were exposed to time intervals of either 0, 3 or 6 seconds. They found that all age groups behave similarly: infants exposed to the non-delayed sensorimotor contingency increased the frequency of their vocalizations but infants exposed to both 3-second and 6-second time intervals did not. [Millar \(1972\)](#) and [Millar & Watson \(1979\)](#) replicated this result in 6- to 8-month old infants exposed to a sensorimotor contingency between arm pulling and an auditory and visual stimulation. Finally, coherent with the above results, [Bahrick & Watson \(1985\)](#) and [Zmyj et al. \(2009\)](#) showed that infants discriminate a 3-second delayed view of their limbs from a real-time view. Nevertheless, this ability emerges at different ages depending on the experimental set-up. Curiously, there is no study to our knowledge that has determined from what delay between an infant’s action and the partner’s response, a social contingency is no longer detected by the infant - indeed, in social contingency studies, non-contingent conditions are either replays of a previous interaction between mother and baby (e.g., [Nadel et al., 1999](#)), or the mother’s observance of the timing of another mother’s responses, i.e., a “yoked condition” (e.g., [Goldstein & Schwade, 2008](#)). Hence, we have no way of concluding whether babies are more tolerant with regard to social contingencies — as social contingencies are intrinsically delayed — and whether

they can detect social contingencies with a delay of more than 3 seconds.

3.1.2 Infants' sensitivity to delayed contingencies

In the previous section, we saw that contingencies with a delay of more than 3 seconds seem to be not detected by babies. But what about contingencies with a delay of less than 3 seconds?

Contingencies involving the physical environment. A first way to answer this question has been to test infants' sensitivity to contingencies involving the physical environment and having delays ranging from 0 to 3 seconds. Millar (1972) exposed 6- to 7-month old infants to sensorimotor contingencies with no delay, or 1 or 2 seconds of delay. He showed that infants are able to detect both non-delayed and delayed contingencies but that they need more time to detect the delayed ones. In another experiment of the same article, the author changed the delay and found that infants notice when the delays changed going from no delay to 1 or 2 seconds of delay.

Contingencies involving the social environment. A second way to investigate how babies' sensitivity to contingencies varies with delay is to study the interactions between babies and their social partners, since from birth and even before, infants are frequently exposed to delayed contingencies through social interactions. From 3 months onwards, infants seem to be sensitive to these delayed contingencies and use them to engage in "protoconversations" with their caregivers (Trevarthen, 1979). Infant-caregiver protoconversations have been extensively studied during the last decades. What we can take away from this literature is in particular the fact that these protoconversations are organized in a turn-taking fashion: both the infant and the caregiver respect minimal gaps and minimal overlaps between their mutual communicative signals (e.g., Gratier et al., 2015). Moreover, these protoconversations between young (4-month-old) infants and their caregivers seem to be organized into approximately 3-second windows (Van Egeren et al., 2001). And more precisely, mothers seem to respond to their young (3-month-old) infants within a time interval of less than 1 second (Keller et al., 1999). Note that the precise time interval respected by the infant and the mother depends on the dyad itself and on the socio-cultural context (see Section 5 for more details). Interestingly, in the case of social contingencies, babies seem to react differently to contingencies with a delay of less than 1 second and to contingencies with a delay ranging from 1 to 3 seconds. Striano et al. (2006), for example, observed that 12-month-old infants preferred to interact with a contingent partner rather than with a partner responding with a delay ranging from 1 to 3 seconds. However, there is no study to our knowledge that precisely compares babies' ability to detect delayed and non-delayed social contingencies. Hence, we cannot conclude whether babies remain more tolerant in their ability to detect delayed contingencies as compared to non-social contingencies.

Contingencies involving feedback of the infant's own movements. A final way to study babies' sensitivity to contingencies with delay has involved the use of contingencies between the baby's arm or leg movements and the proprioceptive and visual feedback from these movements. Researchers have investigated from what delay babies were able to differentiate a live view of their movements from a delayed view, and whether this varied during development. Results show that during the first six months of life, infants seem to be insensitive to small differences in delays (0.5 to 3 seconds). For example, [Rochat & Striano \(2000\)](#), using the preferential looking paradigm, studied this question in 1- to 5-month-old infants. They presented them with two views of their own legs: a non-delayed view vs. a view delayed by 0.5, 1, 2 or 3 seconds. For all age groups, they found no preference between the two views. This absence of preference between non-delayed and slightly delayed views of the infant's own movements has been replicated for 5-month-old infants when they observe their own leg movements ([Hiraki, 2006](#)) or their own face movements ([Collins & Moore, 2008](#), cited in [Zwicker et al., 2012](#), pp. 25-26)¹. In contrast, infants older than 6 months seem to be less tolerant. In [Hiraki \(2006\)](#) and [Collins & Moore \(2008\)](#) (cited in [Zwicker et al., 2012](#), pp. 25-26), respectively 7- and 12-month-old infants behaved differently for a non-delayed and for a 2-second delayed view of their own movements (but not for the 1-second delay — cf. footnote 1 in [Hiraki \(2006\)](#)).

3.1.3 Conclusion

The fact that in the first months of postnatal life the sensorimotor contingency detection mechanism tolerates a maximum delay of about 3 seconds between bodily actions and their consequences might be related to the need for the infant's brain to discriminate between effects caused by the infant's own actions and those produced by the external world. It could be that the observed maximum delay of 3 seconds ensures that only events generated by the infant itself are encoded as being self-generated. Moreover, the developing ability of the brain to detect small temporal changes within the 3-second window of sensitivity could serve to help the infant distinguish between interactions with social partners and interactions with the physical world around her. Indeed, events occurring without delay or with extremely small delays are more likely to be non-social events and events occurring with longer delays within this window are more likely to be social events ([Tarabulsky et al., 1996](#)).

To conclude, contingencies involving a delay of less than 3 seconds seem to be more easily detected by babies. For young babies (less than 6 months of age), there is no evidence that the stability of the delay during the experiment has an effect, as long as the delay remains under 3

¹Note that, the use of the preferential looking paradigm on all of these studies cannot guarantee that infants before 6 months of age are not sensitive to small differences in temporal properties of sensorimotor contingencies. It could simply be that infants had no preference between the real-time and the delayed view, or it could be that the paradigm is not sensitive enough to show the difference (for a more detailed criticism see, [Zwicker et al., 2012](#)).

seconds. On the other hand, for babies over 6 months of age, variations in delay can diminish their contingency detection abilities.

3.2 Relational parameters

A second way for the infant's brain to detect the contingent link between an action and a change in sensory inputs might be to note the degree to which parameters like the frequency, the intensity, and the duration of this change in sensory inputs follow the variations of one aspect of the action. This has been called the "relational parameter" (Gergely & Watson, 1999, p. 105) or the "intermodal form" (Rochat & Striano, 2000, p. 523). Two types of contingencies are then to be considered: (i) analog contingencies, which are congruent in the relational parameter, since one aspect of the contingent stimulus varies according to one dimension of the baby's movements, and (ii) digital contingencies, which are not congruent in the relational parameter but work in an all-or-nothing mode: a fixed contingent stimulus is displayed each time one aspect of the baby's movements reaches a predetermined threshold. We will try to answer two questions: (i) to what extent are infants sensitive to the congruence between variations in action and feedback? and (ii) what kind of sensorimotor contingencies are most easily detected by infants: analog or digital?

3.2.1 To what extent are infants sensitive to the congruence between variations of the action and those of the feedback?

The study of social interactions provides an initial insight in answering this question. As noted by Bigelow & Power (2014, p. 559), "*in naturally occurring interactions with young infants, maternal responses [...] match the infants' actions in modality, intensity, affect, and tempo*". This fact might mean that infants tend to develop a sensitivity to the presence of such congruence in both the social and non-social contingencies that they experience.

As concerns non-social sensorimotor contingencies, only few studies have assessed to what extent infants are sensitive to the congruence between the variations of action and feedback. Rochat & Striano (1999) tested this sensitivity in 2-month-old infants by using the non-nutritive sucking paradigm. The authors observed infants' behaviour during the exploration of an analog contingency for which the pitch of an auditory stimulus varied according to the baby's pressure of sucking, and the exploration of a digital contingency for which a fixed auditory stimulus was displayed each time the baby's pressure of sucking reached a predetermined threshold. The authors found that the infants tested in the analog condition tended to vary their sucking, but not the ones tested in the digital condition, suggesting that 2-month-old infants are sensitive to the congruence between the variations of the action and those of feedback. Using the same set-up, the authors also tested newborns. Here they found no increase in control, neither in the analog, nor the digital conditions. Taken together, these results suggest that sensitivity to the congruence between the

variations of the action and those of feedback emerges between birth and 2 months of age. Note however that the data could also be explained by lack of ability to control amplitude of sucking at birth.

With a similar aim, Fagen & Rovee (1976) used the mobile paradigm to explore the ability of 3-month-old infants to detect the congruence between variations of their kicking rate and those of the mobile's movements. To vary the degree of relation between the kicking rate of the infant and the visual feedback they used mobiles made of more or fewer elements: for the same kicking rate a mobile with few elements generates a smaller visual response than a mobile with many elements. The authors exposed the infants to one mobile during two days, and then switched to another mobile with more or fewer elements. Infants noticed this change: they adapted their kicking rate to maintain the same amount of visual stimulation as before and they showed "negative contrast effects" (crying) when the shift was too abrupt. Mast et al. (1980) replicated this experiment: they trained infants with a mobile having 6 or 10 similar components and tested them with the mobile modified to have only 2 of its components. Again, they found that infants noticed the change in number of components: they increased their kicking rate, they decreased their visual attention and they increased their negative vocalizations. In addition, the authors found that the larger the change was in the number of components, the longer the infants showed altered behaviours up to 24 hours after training with the original mobile.

Taken together, these studies suggest that from 2 months onwards, babies seem to be sensitive to the congruence between the variations of the action and those of feedback and seem able to modify their behaviours in order to explore this congruence.

3.2.2 What kind of sensorimotor contingencies is most easily detected by infants: analog or digital?

The previously mentioned study by Rochat & Striano (1999) had shown that infants seem to be sensitive to both analog and digital contingencies. But one might ask which kind is more easily detected by infants, or in other words, does congruence in relational parameter found in analog contingencies facilitate their detection? To our knowledge, apart from Rochat & Striano (1999), only Voltaire et al. (2005) directly compared analog and digital sensorimotor contingencies. In their experiment, Voltaire et al. (2005) used a sensorimotor contingency between pressing a panel with the foot, and the appearance of a set of lights. They compared the response rates of 4-month-old infants in an analog condition (i.e., the intensity of the lights varied in proportion to the foot press) and in a digital condition (i.e., the intensity of the lights was not varied). They found that infants in both conditions showed learning of the sensorimotor contingency but peaks in response rates were higher in the analog condition than in the digital condition. Watson (1984) also noted, comparing his work to that of Rovee-Collier (see, e.g., Rovee & Rovee, 1969), that

analog sensorimotor contingencies are better detected by infants than digital contingencies. He explained that this difference could be due to the fact that analog contingencies can be detected by correlating information on two dimensions (temporal and relational) whereas digital contingencies involve only one dimension of correlation (temporal). However, one could take the opposite stance, namely that a one-dimensional correlation should perhaps be easier to detect.

3.2.3 Conclusion

Infants from 2 months of age seem sensitive to the congruence between the variations of the action and of feedback found in analog contingencies. They also seem able to detect both analog and digital contingencies; however, it seems that whether a contingency is analog or digital has consequences on babies' ability to detect the contingency. The effect of each type of contingency (analog or digital) might depend on babies' expectations: the analog might be more beneficial in situations when the baby is used to obtaining analog effects, as for example shaking a rattle more or less quickly to hear sounds at different rates and, conversely, the digital might be more beneficial in situations that require, for example, pressing a button.

3.3 Spatial parameters

The third type of cue that the brain might use to determine whether there is a link between an action and a change in sensory inputs involves the spatial correspondence between the two events. This spatial correspondence can involve a correspondence of location and/or a correspondence in motion. Correspondence in location means that the action and its consequences occur at the same place in space, or are aligned in the visual field. A correspondence in motion means that the trajectory of the action and the trajectory of its visual or auditory consequence are similar.

3.3.1 Correspondence in location

Only one paper, namely [Millar & Schaffer \(1972\)](#), directly addresses the question of correspondence in location. The authors exposed 6-, 9- and 12-month-old infants to a contingency between touching a graspable cylinder and a visual and auditory feedback. They split infants into three groups depending on the angular distance between the cylinder and the contingent feedback: 0° (which corresponds to a perfect alignment in the visual field), 5° (which corresponds to small misalignment in the visual field), and 60° (which corresponds to a large misalignment in the visual field). They found that all infants can learn the contingency when feedback is displayed at 0° or 5° . This learning occurred at the same rate for these two conditions and at all ages. But when the angular distance was 60° , only the 9- and 12-month old infants were able to learn the contingency. The 6-month-old infants behaved similarly to infants exposed to a non-contingent stimulation. What could explain this difference between 6 and 9 months of age? According to the authors, the

difference could be explained by the fact that in the condition where the angular distance was 60° it was impossible for babies to focus their visual attention on the cylinder and on visual feedback at the same time. This would have prevented 6-month-old babies from detecting the contingency - they seemed not able to handle the cylinder without looking at it - while 9-month-old babies seemed not to be hindered in their learning by this arrangement - they seemed able to handle the cylinder at the same time they were looking at the visual feedback box (and therefore not looking at the cylinder). Thus, correspondence in location between an action and its feedback seems to be critical for young babies in order to be able to detect a contingency, but seems to become less important by the end of the first year of life as infants' ability to divide their attention improves.

3.3.2 Correspondence in motion features

Correspondence in motion features has been studied through the use of contingencies involving visual feedback of the infant's own movements. Using the preferential looking paradigm, Rochat and colleagues (Morgan & Rochat, 1997; Rochat & Morgan, 1995, 1998, see Rochat, 1998, for a review) explored precisely what aspects of spatial information were considered by 3- and 5-month-old infants in order to recognize visual feedback of their leg movements. The authors proposed two aspects of spatial features that could be involved: movement directionality and spatial orientation. To distinguish the role of these two aspects, Rochat and colleagues designed three different conditions of an experiment in which they assessed whether infants were able to distinguish a live video of their own legs and a video of their legs where in condition n°1 movement directionality and spatial orientation were modified (observer view with inversion between the right and left legs), in condition n°2 only movement directionality was modified (ego-centered view with inversion between the right and left legs), and in condition n°3 only spatial orientation was modified (observer view without any inversion between the right and left legs). Note that during the experiment, the infant's own limbs were hidden from her view. The results suggest that movement directionality is a more important aspect of motion in determining contingency than the spatial orientation. Indeed, infants distinguished the live view of their legs from the modified view in the two first conditions — in which movement direction was modified due to an inversion of right and left legs — but they showed no preference between the two views in the last condition — in which there was no variation in movement direction but a modification of the spatial orientation. In addition, Rochat and his colleagues (see Rochat, 1998, for a review) showed that familiar visual characteristics of the limbs were not mandatory for limb movement recognition — they eliminated these characteristics by putting thick striped socks on the infant's legs. The crucial role of movement directionality in discriminating contingent from non-contingent displays was replicated for arm movements in 5-month-old infants by Schmuckler (1996).

3.3.3 Contradictory findings

The experimental findings presented above seem to suggest that for infants to detect a contingency, the infant's action and the resulting effect must correspond in movement directionality. Nevertheless, infants appear to be perfectly able to detect sensorimotor contingencies without any spatial correspondence², as in the mobile paradigm, paradigms involving touch events, or in gaze contingent paradigms. This divergence in results could be explained by the cognitive requirements of detecting contingencies between limb movements and both their visual and proprioceptive consequences. Indeed, detecting this kind of contingencies requires that infants compare motor commands with two kinds of sensory feedback, namely information coming from proprioception and from vision. Thus, congruence in movement directionality may not be mandatory for simple sensorimotor contingency detection but may be mandatory when contingency detection involves visual and proprioceptive integration of limb movements.

3.3.4 Conclusion

The spatial parameters underlying contingency detection are undoubtedly important in determining self and external world differentiation. It makes sense that spatial correspondence and intermodal integration should be critical and useful when infants detect contingencies involving their own body. In contrast, spatial correspondence is presumably less critical when infants need to detect contingencies involving the physical environment, and even less critical when infants need to detect contingencies with the social environment. Thus, we would suggest that the infant uses the gradient going from spatially congruent contingencies to spatially non-congruent contingencies to distinguish between own body contingencies, contingencies involving the physical external world and contingencies involving social partners. Obviously, this differentiation process would be both progressive and continuous over development: in this way, babies would gradually refine their model of the world as they interact with their environment. Concerning contingency detection, there is no consensus on the need for spatial parameters to be respected in order for a contingency to be detected. However, we can note that for a contingency requiring the manipulation of an object in young babies, both the object handled and the effect of the manipulation should be aligned so that the baby does not have to focus on two different places in his or her visual field. On the contrary, for contingencies that do not involve the baby focusing his/her visual attention on both the action to be performed and the stimulation, spatial colocation of action and effect does not seem necessary. In addition, congruence in movement directionality between movements and effects seems to be required to help babies to integrate the visual and proprioceptive feedback of their own movements.

²One might argue as [Schmuckler & Jewell \(2007\)](#) that in the mobile paradigm there is still a correspondence in direction (perhaps the mobile moves to the right when the infant moves its limb to the right and vice versa) but it appears obvious that in this case the spatial correspondence is mostly not reliable.

4 Amount and frequency of exposure

In this section, we will examine four aspects of exposure conditions to a contingency that influence the “detectability” of this contingency by infants. First, we will try to identify the amount of exposure to a contingency needed to make a baby able to detect it. Second, we will consider how the time window between two repetitions of a contingency affects a baby’s ability to detect that contingency. Third, we will show that the probability of triggering the contingent feedback after completing the action (probability of occurrence) influences contingency detection. And finally, we will see how pre-exposure to a contingent or non-contingent situation affects contingency detection.

4.1 Amount of exposure

How much exposure to a sensorimotor contingency is necessary for an infant to detect it? Curiously, this obvious question has not been directly addressed in the literature on sensorimotor contingencies. However, in an attempt to answer this question, we can for example examine the amount of exposure needed for contingency detection in experiments using the mobile paradigm, which is the most frequently used paradigm in the literature. Here, it is generally found that 3-month-old infants need between 3 and 6 minutes of exposure to the contingency to detect it (see the review by [Rovee-Collier, 1999](#)). Note that similar or shorter times of exposure are reported for other paradigms such as the non-nutritive sucking paradigm (e.g., 4 minutes in [Siqueland & Delucia, 1969](#)), the preferential looking paradigm (e.g., 1 minute in [Zmyj et al., 2009](#)) or for other operant conditioning paradigms (e.g., 1 to 5 minutes in [Wang et al., 2012](#), in this case, a contingent between eye movements and a visual stimulation).

Nevertheless, long-term retention of a sensorimotor contingency may require longer exposure. For this question we can again refer to the mobile paradigm: [Linde et al. \(1985\)](#) showed that 2-month-old infants exposed for 18 minutes to the mobile paradigm remembered the contingency for one week, while infants exposed for 6 and 12 minutes did not. An additional question concerns the effect of using several exposure sessions instead of a single session. In most experiments, one session seems sufficient for the infant to learn the contingency. However, considering again the mobile paradigm, it appears that exposure spread over several days results in longer duration of long-term retention than the same amount of exposure in a single day. [Linde et al. \(1985\)](#) exposed 2-month-old infants to a mobile for 18 minutes. They split infants into three groups: one group was trained for 18 minutes for a single session, one group was trained for 9 minutes per day on two consecutive days, and one group was trained for 6 minutes per day on three consecutive days. The authors found that infants in all groups learned the contingency but that infants trained with exposure spread over several days remembered the contingency for much longer (2 weeks instead of 1-2 days). Note that the duration of the long-term retention is dependent on the age of the

infants, and increases gradually with age (see Rovee-Collier, 1999, for a review).

4.1.1 Conclusion

The take home message is that infants typically need a very short exposure — only a few minutes — to detect sensorimotor contingencies. However, it appears that the number of learning sessions influences long-term retention of this learning. Optimal learning seems to be achieved when learning sessions are spread over several short sessions.

4.2 Time window between two repetitions of a contingency

We can assume that an infant needs several experiences of a contingency to learn it. Thus, after having performed a contingent action, the infant may need to reproduce this action several times to successfully reinforce the link between this action and an associated effect. According to Watson (1967), there is a time window following the experience of the “action-effect” couple that is favourable to contingency learning: the infant would be more likely to learn a contingency if the re-experience of the “action-effect” couple falls within this time window. Two constraints must be considered to define this time window: on the one hand, the time interval required by the baby to encode the first experience of the “action-effect” couple and, on the other hand, the time interval during which the contingency can be kept in memory by the baby. These two time intervals define respectively the lower and upper limits of the time window during which re-exposure to the “action-effect” couple after its first occurrence is most likely to facilitate the learning of a contingency. Watson (1967) suggested that, for 3-month-old infants, this time window is between 3 to 5 seconds after the experience of the “action-effect” couple, where 3 seconds corresponds to the time needed by infants to register the contingency, and 5 seconds corresponds to the duration of infants’ working memory. Millar (1972) has further argued that this time window may be critical at the beginning of the learning of a new sensorimotor contingency but may become less important when learning has already been consolidated. Thus, Millar (1972, p. 2) observed in his studies that *“4-month-old infants would often return to a response-feedback task after having been “distracted” for periods of time well in excess of the critical time interval suggested by Watson, and continue operant responding at the rate where they left off”*. Unfortunately, there is to our knowledge no study to date — apart from Watson’s — that helps in determining whether there is a critical time window and if so, what that time window might be.

4.2.1 Conclusion

There is no consensus on the delay between two repetitions of a contingency that is most favourable for contingency learning. Moreover, this delay is a difficult parameter to control in an experimental setting as it depends on each baby’s individual rate of performing the contingent action during

exposure to the contingency. However, this parameter could be a relevant parameter to consider when explaining the substantial individual differences in ability to learn a contingency discussed in the introduction section (Section 1) of this paper.

4.3 Probability of occurrence

In the majority of experiments involving sensorimotor contingencies, each time the infant makes a motor action, a perceptual consequence occurs. Obviously, in the infant's real environment this is not always the case: some contingencies are "perfect" (as they occur 100% of the time) but others are "less-than-perfect", or "imperfect" contingencies. "Perfect" contingencies are contingencies for which in 100% of cases the performing of the operant action triggers feedback³, while "imperfect" contingencies are contingencies for which the performing of the operant action triggers feedback only in a certain proportion of cases. A case in point is the social contingency between infants' babbling and mothers' vocalizations. A "perfect" contingency would be that the mother vocalizes if and only if the infant babbled just before. However obviously in real life, this never happens. Social contingencies are always "imperfect": sometimes the infant would babble but the mother does not react and sometimes the mother vocalizes spontaneously (i.e., without the infant babbling before). But to what extent are babies sensitive to the different degrees of "perfection" of contingencies? Are some degrees of "perfection" more easily detected? Watson (Watson, 1984, 1985) tested 4-month-old infants divided into four experimental groups corresponding to four degrees of "perfection" of a sensorimotor contingency:

- Group 1: "perfect" contingency — a face appears on a screen if and only if the baby has made a kick.
- Group 2: each kick of the baby generates the appearance of a face on a screen — but some face appearances (6 per minute) occur without the baby having kicked.
- Group 3: appearances of a face on a screen occur if the baby has made a kick — but 25% of the baby's kicks do not produce face appearances.
- Group 4: some face appearances (6 per minute) occur without the baby having made a kick and some (30%) of the baby's kicks do not produce face appearances.

Counterintuitively, Watson found that the infants exposed to the "perfect" sensorimotor contingency (Group 1) were the ones that learnt the least, and that infants exposed to the least "perfect" sensorimotor contingency (Group 4) were the ones that learnt best. He explained this result by

³Note that there is sometimes confusion in the definition of a "perfect" contingency. Indeed, this can be understood from the temporal, spatial or relational point of view (see Section 3) or, as is the case here, from the point of view of the probability of occurrence.

proposing that “less-than-perfect” sensorimotor contingencies might be more interesting for infants at this age.

Consistent but less clear findings were found by Pomerleau et al. (1992). They tested 5-month-old infants with four different degrees of “perfection” of a sensorimotor contingency between touch of an object and movements of this object: (1) 100% of touches triggered feedback, (2) 75% of touches triggered feedback, (3) 50% of touches triggered feedback, and (4) 50% of touches triggered feedback + non-contingent events occurred. They found that infants had similar performance in contingency learning across all five conditions. Nevertheless, the authors found that infants exposed to the “perfect” contingency showed a higher decrement in their operant responses over the experiment compared to infants exposed to “less-than-perfect” contingencies, suggesting that “less-than-perfect” contingencies enhanced infants’ interest.

4.3.1 Conclusion

We can conclude from this section that “imperfect” contingencies seem to be more beneficial for contingency detection as compared to “perfect” contingencies. While it is not clear whether “imperfection” actually increases babies’ detection abilities, it does seem to have a positive influence on babies’ interest in the contingent task. According to Gergely & Watson (1996)’s “biofeedback theory” the use of “imperfect” contingencies can only be beneficial for babies over 3 months of age. In their view it is only from 3 months of age that babies become more interested in “imperfect” than in perfect contingencies. Younger babies, the authors suggest, prefer to explore “perfect” contingencies, since at that age they are focused on the exploration of their own body. It is noteworthy however that Gergely and Watson’s theory was based on the results of a visuomotor matching study in which what they called “imperfect” contingencies were actually time-delayed rather than subject to a probability of occurrence lower than 100% (Bahrick & Watson, 1985). It is also important to note here that Watson’s theory is based on the results of a single study, which has never been replicated (although it has been the object of unpublished replication attempts).

4.4 Prior exposure to contingent and non-contingent stimulations

One might ask to what extent (i) prior exposure to a contingent stimulation influences an infant’s subsequent learning of a new contingency and (ii) prior exposure to a non-contingent stimulation influences learning of a contingency involving the same stimulation or of a contingency involving a new stimulation.

4.4.1 Prior exposure to a contingent stimulation

Prior exposure to a contingency seems to enhance the subsequent learning of a new contingency. Finkelstein & Ramey (1977) and Ramey & Finkelstein (1978) trained 3- to 9-month-old infants for

3 or 4 days using a variety of different types of contingent stimulation. Then, on the following day, they tested the infant's sensitivity to a new contingency. The contingencies used in training and test involved both different actions and different feedback. In the 1978 paper, training and test sessions also occurred in different contexts (respectively the infants' home and the laboratory). In both studies, the authors showed that at all ages contingently trained infants showed faster learning rates for the new contingency compared to control infants who during training were exposed to a non-contingent audiovisual stimulation or no stimulation at all.

4.4.2 Prior exposure to a non-contingent stimulation

The literature is unclear about whether prior exposure to a non-contingent stimulation has no effect, or whether it enhances or degrades learning abilities for a subsequently presented contingency involving this same stimulation. To understand this, we will separate experiments in which prior exposure to the non-contingent version of the stimulation is of short duration and occurs immediately before the contingent acquisition (i.e., short-term exposure); and experiments where there are several days of non-contingent prior exposure (i.e., long-term exposure).

Positive effects or absence of effects. As concerns short-term exposure, Millar (1972) showed in 6-month-old infants that learning of a contingency is not prevented and is even enhanced by a few minutes of pre-exposure to the non-contingent version of a stimulation. Gekoski & Fagen (1984) also found that 6 minutes of exposure to a non-contingent mobile did not prevent 3-month-old infants from subsequently learning a contingency with a new mobile in the same context. Regarding long-term exposure, Ramey & Finkelstein (1978) showed that 3-month-old infants were perfectly able to learn a new contingency displayed in the laboratory after 3 or 4 days of exposure to a non-contingent stimulation in their homes. Moreover, Gekoski & Fagen (1984) also exposed 3-month-old infants to a non-contingent mobile during 3 or 7 consecutive days and showed that this did not prevent subsequent learning of a contingency with a similar mobile in a similar context (infants' home crib).

Negative effects. In contrast, other studies have shown opposite results, namely lower learning abilities in infants who have been pre-exposed to a non-contingent version of the stimulation. As regards short-term exposure, DeCasper & Carstens (1981) showed that newborns who were pre-exposed to a song for 15 minutes (without any contingency between the song and the infants' behaviour) were not able to learn a contingency presented to them a few hours later between the same song and their sucking, whereas newborns not previously exposed to the song were able to learn the contingency. Concerning long-term exposure, lower learning abilities in infants pre-exposed to the non-contingent version of a stimulation was shown by Watson (1971). He trained 2-month-old infants on 14 consecutive days in their homes with daily exposure to (i) a contingent

mobile, (ii) a similar but non-contingent moving mobile, or (iii) a similar but stationary mobile. One day or 6 weeks after the end of this home training, infants were tested at the laboratory with the same contingent mobile. He showed that infants trained in the similar but non-contingent condition did not learn the contingency at all even when tested 6 weeks after the end of the training, while infants from the contingent and similar but stationary groups were able to learn in both testing sessions. Moreover, Watson (1977) (cited in [Watson, 1979](#), p. 49) noted that 2-month-old infants who had already experienced their own non-contingent moving mobile at home were less likely to learn a contingency involving a new mobile when tested at the lab. Negative effects of long-term exposure to different but non-contingent stimulation were also observed. For example, [Finkelstein & Ramey \(1977\)](#) found that 6- and 9-month-old infants trained with a different and non-contingent stimulation were less good at detecting a new contingency than infants trained with a different but contingent stimulation. Also, [Dunham & Dunham \(1990\)](#) found that 3-month-old infants whose interactions with their mother were less contingent (the degree of contingency was assessed in a 5-minute session of free play) were the infants that showed lower learning rates in a non-social contingency learning task.

4.4.3 Conclusion

Very clearly, prior-exposure to a contingent situation seems to increase babies' ability to subsequently detect a new contingency. With regard to pre-exposure to the non-contingent version of a stimulation (or to a non-contingent and different stimulation), the lack of consensus in the literature makes it impossible to confidently conclude on how this affects babies' subsequent sensitivity to a similar or new contingency. Nevertheless, it would seem prudent to prevent babies from being exposed to a non-contingent version of a stimulation in order to ensure the successful operation of a contingent experimental set-up.

5 Inter-individual differences

5.1 Intrinsic motivation

Given the abundance of sensory inputs and motor outputs that the infant's brain has to process, the problem arises, not only of detecting sensorimotor contingencies, but also of choosing which ones to explore: the infant clearly needs an exploration strategy. The study of exploration strategies in infants is a rich field of research which is distinct from the research on sensorimotor contingency detection and which would deserve its own review. Nevertheless, in order to provide a complete overview of the factors influencing sensitivity to sensorimotor contingencies in infants, it will be useful here to briefly discuss it. First, babies are obviously motivated to explore their environment in order to satisfy their physiological needs, which is known as extrinsic motivation. In addition, a

second type of motivation, called intrinsic motivation; seems to guide babies' exploration. We will focus here on this second type of motivation, as it appears to be central to babies' spontaneous exploration behaviours

The concept of intrinsic motivation, also called "curiosity", has been richly documented in psychology (see, e.g., Oudeyer et al., 2016, for a review). It has recently also been widely used in developmental robotics (Oudeyer et al., 2016), a discipline that seeks to create agents capable of open-ended and unsupervised learning in a "baby-like" manner. According to this framework, infants' exploration of the environment that does not lead to the satisfaction of physiological needs (i.e., extrinsically motivated) might be explained by the brain's production of an intrinsic reward in situations that provide learning. Sensorimotor contingency learning would be such a rewarding situation per se for infants, and infants' active exploration of sensorimotor contingencies would be organized in order to optimize learning.

As regards the first requirement — namely that learning of sensorimotor contingencies in infants is a rewarding situation — evidence has been found by Lewis, Sullivan and their collaborators (e.g., Lewis et al., 1990, 1985; Sullivan & Lewis, 1989). In their experiments, they measured emotional responses of 2- to 8-month-old infants during a contingent learning session. They found that in the acquisition phase (when the contingency was present) infants who were learning the contingency showed positive emotional responses (e.g., cooing, smiling, vocalizing) and that in the extinction phase (when the contingency was removed), infants who had learned the contingency showed negative emotional responses (e.g., fussiness, cries). Moreover, the authors showed that infants exposed to the same stimulation but not contingently did not show such emotional responses, suggesting that infants' behaviour in the contingency condition cannot simply be explained by the presence (in the acquisition phase) or absence (in the extinction phase) of stimuli. These results seem to confirm that contingent learning in infants might be rewarding per se and not only because it gives the baby the opportunity to experience interesting stimuli.

The second requirement — i.e., that infants' active exploration of sensorimotor contingencies needs to be (implicitly) organized in an effective way in order to optimize learning — can be discussed at different time scales. At the developmental time scale, this requirement implies that an infant's exploration preferences should constantly adapt to match the infant's current motor and cognitive abilities. For example, before being able to reach and grasp objects, the infant would be interested in looking at its hands moving in front of its face or in moving its arms randomly and then by chance touching objects and repeating movements that were rewarded by such change in sensory inputs. Later, when reaching and grasping are mastered, the infant might change its focus of interest and spend most of its playing time manipulating objects. At the time scale of one particular playing episode, the second requirement suggests that the infant's exploration of its environment should be organized in order to optimize its gain in knowledge. We will now review

evidence supporting this claim. [Kidd et al. \(2012\)](#) have tested this hypothesis by measuring 7- to 9-month old infants' interest in visual sequences of objects appearing and disappearing. The sequences displayed to the infants varied in their "complexity" (mostly here their predictability): the sequences went from highly redundant sequences which were very easy to predict for the infants, to random sequences which were not predictable for the infants; and between these two extremes, there was a range of degrees of "complexity". The authors found that infants were more interested in the sequences of intermediate complexity (i.e., they had longer looking times for these sequences) than in sequences with too low or too high complexity. Interestingly, the authors found that each infant had his/her own optimal level of complexity.

Another way developmental psychologists have tested to what extent infants preferentially explore learning situations that optimize their gain in knowledge has been to expose them to situations that go against their expectations — and to consider that infants are aware that unexpected situations potentially provide a high gain in knowledge. [Stahl & Feigenson \(2015\)](#) tested this hypothesis in 11-month-old infants by presenting them with two toys: one toy was a "normal toy" and the other was an "unexpected toy," namely a toy whose behaviour breaks a physical law (it passes through a wall, teleports itself, or does not fall though it is not on a surface). After seeing presentations of an "expected" and an "unexpected" situation, the infants had to choose which of the two toys they preferred to play with. The authors found that the infants chose the "unexpected" toy significantly more often. Interestingly, the authors observed that when the infants had the opportunity to play with the "unexpected toy", they played differently depending on the physical law previously broken by the toy (e.g., when the toy had broken the law of solidity, infants banged it on the table and when the toy had broken the law of support, infants dropped it onto the table). This last result would suggest that infants' subsequent exploration was driven by their appetite to gain further knowledge about the unexpected characteristics of the toy. In addition, [Sim & Xu \(2017\)](#) showed that 13-month-old infants' preference for exploring sources of unexpected events might be extended to improbable events — this is in opposition to the previous study in which unexpected events were physically impossible. Coherent results were also found in older infants (18 months of age) by [Esseily et al. \(2015\)](#), who showed that unexpected (humorous) events during demonstration may enhance observational learning of a new tool-use action.

Thus, it appears that both at developmental time scale and within a playing session, babies seem to be intrinsically motivated to explore situations that are most profitable for learning, given their current motor skills and expectations about the world. It is important to note that at both time scales, infant's exploration of the environment is also guided by the baby's social partners, which is known as "scaffolding" ([Malcuit et al., 1988](#); [Pomerleau et al., 1992](#)). Caregivers organize the baby's exploration space so that learning situations are in accordance with the baby's current abilities and interests.

5.1.1 Conclusion

To conclude this section, babies' extrinsic motivation to obtain a contingent stimulation on the one hand, and babies' intrinsic motivation to search out sensorimotor contingencies on the other hand, should be considered in order to understand contingency detection in babies. Regarding extrinsic motivation, social stimulation used as contingent feedback, or encouragements of a caregiver when the baby succeeds in obtaining the contingent feedback (which is frequently the case in the baby's daily life) might be profitable for contingency detection. With regard to intrinsic motivation, contingencies of intermediate complexity — i.e., neither too easy nor too hard to detect — might be more easily detected by infants. Appropriate intermediate complexity is to be defined according to the age of the baby, or more precisely according to each baby and the evolution of its performance during learning of a contingency.

5.2 Infants' individual abilities and temperament

An obvious way to observe the influence of infants' individual abilities on sensorimotor contingency detection would be to look at the evolution of sensorimotor contingency detection across development. However simply observing an improvement in contingency detection with age does not allow one to determine whether this improvement was caused by maturation or by the appearance of a new sensory, motor or cognitive ability. Moreover, because infants may simultaneously acquire several new abilities, longitudinal observations will not allow one to determine which specific ability caused the improvement in contingency detection.

One way to bypass this issue is to study infants of the same age but having different individual abilities. Developmental psychologists have developed questionnaires and experimental tasks to determine the individual level of an infant in a specific domain. Experimenters can then determine to what extent inter-individual differences in this domain predict inter-individual differences in sensorimotor contingency detection. For example, infants' level of visual attention appears to be a fairly reliable predictor of their contingency detection abilities (e.g., [Dunst & Lingerfelt, 1985](#); [Fagen et al., 1987](#); [Hayes et al., 1982](#)). Indeed, [Hayes et al. \(1982\)](#) found that 3-month-old infants with low visual attention (measured in a baseline period as the number of times the infant fixated a light alternating between two positions) did not show learning of a contingency whereas, tested in the same contingent task, infants with a high degree of visual attention did show evidence of learning. Consistent results were found by [Dunst & Lingerfelt \(1985\)](#) in 2- to 3-month-old infants but using maternal ratings as the measure of infants' visual attention. Additional but less direct evidence of the influence of visual attention on contingency detection was found by [Fagen et al. \(1987\)](#), who observed that visual attention score (measured here using a parental questionnaire that evaluates babies' duration of visual orientation towards stimuli) was a good predictor of the propensity of 3- to 4- month-old infants to become fussy in a 2-day contingent experiment with

the mobile paradigm. More precisely, the authors found that babies who cried and did not cry during the experiment significantly differed in their visual attention score: the “cryers” showed lower scores in visual attention than the “non-cryers”.

Another way of correlating sensorimotor contingency detection and individual abilities is to compare infants of the same age but coming from typical and atypical populations. One interesting atypical population is preterm infants: these infants may sometimes show impaired abilities in regulation of arousal, visual attention, attention shifting, motor skills, motor control and memory (e.g., [Delobel-Ayoub et al., 2009](#)). Thus, some authors have tested preterm infants with the mobile paradigm (e.g., [Gekoski et al., 1984](#); [Heathcock et al., 2004, 2005](#)). Compared to typical infants of the same age under the same experimental conditions, preterm infants showed impairment in their ability to detect the mobile contingency. At 3 months of age, they did not detect the contingency ([Heathcock et al., 2004, 2005](#)) or needed more time to detect it ([Gekoski et al., 1984](#)) and they did not show retention of the contingency ([Gekoski et al., 1984](#)). Similar results have been found with other atypical populations, such as infants with Down syndrome ([Ohr & Fagen, 1991](#)), spina bifida ([Taylor et al., 2013](#)) or congenital heart disease ([Chen et al., 2015](#)). Despite these negative findings it nevertheless seems clear that contingency detection must still be a core mechanism in human learning.

Infants’ temperament has also been studied as a potential factor influencing contingency detection. For example, [Lemelin et al. \(2002\)](#) measured the correlation between 6-month-old infant’s level of irritability (scores were obtained from mothers’ ratings) and their propensity to learn a contingency between pulling with their arm and appearance of an audiovisual stimulation. The authors found that an infant’s level of irritability was correlated with the infant’s ability to detect the contingency: the more the infant was rated as irritable, the less the infant was good at detecting the contingency.

5.2.1 Conclusion

Overall the findings described above suggest that infants’ abilities to detect sensorimotor contingencies might in part be dependent on infant’s individual abilities (e.g., visual attention) and temperament (e.g., propensity to be fussy). The large inter-individual variability in learning abilities discussed in the introduction of this article deserves more attention from researchers in developmental psychology, and should not simply be a factor that researchers avoid by omitting less-attentive or poorly performing babies.

5.3 Socio-cultural context

Caregivers from different cultures seem to react differently to their infants’ vocalizations, and this both in the modality of responses (e.g., German mothers use more visual responses than Nso

mothers, Kärtner et al., 2010), in the frequency of responses (e.g., Cameroonian mothers are less responsive to their infant' vocalizations than Italian mothers, Bornstein et al., 2015) and in the interval before responding (e.g., Indian mothers had more "togetherness" with their infants than French mothers, Gratier, 2003). Moreover, there are also inter-individual differences within the same culture, for instance depressed caregivers are less responsive than non-depressed caregivers (see, e.g., Field, 2010, for a review). Developmental psychologists have studied to what extent these differences in caregivers' responsiveness influence infants' sensitivity to sensorimotor contingencies. From early on infants seem to prefer the specific level of responsiveness of their own caregiver (e.g., Watson, 1985). Bigelow (1998) showed that 5-month-old infants were more responsive to strangers who had a level of responsiveness similar to their mother's, compared to strangers who had different levels of responsiveness (either more contingent or less contingent). This result was replicated by Bigelow & Rochat (2006) who found that even 2-month-old infants interacted more with strangers that had a similar level of contingent responsiveness as their own mothers. Moreover, Bigelow & Power (2014) found that the degree of contingent responsiveness of mothers correlates with the ability of infants to detect social contingency: infants with high responsive mothers reacted to the still-face experiment at an age that was 1 month earlier than infants with low responsive mothers. As we saw previously, Dunham & Dunham (1990) found similar results for non-social contingency detection in 3-month-old-infants: the authors found a correlation between the degree of contingency in mother-infant interaction and infants' learning of a contingent task. Also, infants of depressed mothers reacted less negatively to experimentally induced non-contingent interactions, suggesting that they are more used to non-contingent behaviour in their mothers (e.g., Field et al., 2005).

5.3.1 Conclusion

In conclusion, this section suggests that socio-cultural context should be considered in order to understand babies' sensitivity to sensorimotor contingencies. Thus, it seems important to assess the contingency level of the relationship between the caregiver and the baby (see, e.g., Dunham & Dunham, 1990; Bigelow & Rochat, 2006; Bigelow & Power, 2014, for methods of assessment), to either take this into consideration in the data analysis, or where possible to adapt the contingency to each baby accordingly (i.e., a very responsive set-up contingent for babies with very responsive mothers and vice-versa).

6 Conclusion

This literature review has provided a detailed overview of babies' sensitivity to sensorimotor contingencies and suggests practical advice to researchers on how to optimise their experimental designs

in such a way that babies can easily detect the contingency employed. In the first section, we showed that babies' ability to detect a contingency depends on the action and feedback involved in that contingency. Thus, it seems preferable to use an action that is part of the baby's motor repertoire, is naturally interesting for the baby at its particular phase of development, is salient, as well as providing multi-sensory and attractive feedback. In the second section, the reviewed studies suggest that contingency detection depends on three parameters of the contingency: the temporal parameter, the relational parameter and the spatial parameter. It therefore seems preferable (i) to use a delay of less than 3 seconds between action and feedback, to not vary this delay during the study (at least from the age of 6 months), (ii) to use an analog rather than a digital contingency (even if this choice may not be critical), and (iii) to ensure that for young babies (before the age of 9 months) the action and feedback are simultaneously visible in the baby's visual field, and to respect a congruence regarding movement direction between the action and visual feedback for the contingencies involving movements of the body as action and feedback. In the third section, we showed that conditions of exposure to a contingency had an influence on babies' ability to detect it. It seems preferable to privilege learning spread over several short sessions, and to provide prior exposure to other contingent situations. In addition, "imperfect" contingencies (i.e., in which the probability of feedback occurring after the action is less than 100%) seem to be more easily detected by babies. The last section of this literature review highlighted the fact that there is a high inter-individual variation in contingency detection and that these variations can be explained by the baby's motivation to detect a contingency, the baby's general abilities (e.g., visual attention) and temperament, as well as the familial and cultural context.

Although this literature review provides a comprehensive picture of sensorimotor contingency detection in babies, the question of the reproducibility of previous studies, as well as the robustness of the conclusions drawn from them remains open. Indeed, current practice in developmental psychology leads researchers (i) to publish only positive findings, so publications concerning a previously shown effect can only confirm that effect, which creates the illusion (sometimes misleading) that the effect is robust, and (ii) to disregard variability from one infant to another by focusing on significant effects observed at group level (despite the unreliability of this method with groups that most often include a small number of babies), rather than exploring inter-individual differences that may explain why an effect is rarely shown by all babies. A response to the first observation has appeared in recent years with the rise of meta-analyses, as well as the emergence of projects such as "Many Babies" (Frank et al., 2017) promoting the replication of studies around the world in order to assess the robustness of the observed effects. The application of this methodology to studies on contingency sensitivity would thus be beneficial to the field. Concerning the second problem, namely the lack of interest for inter-individual variability, there is a need to focus on understanding what makes some babies "succeed" (here, by detecting contingencies) while others, within or

between studies, do not. Obviously, this requires a large number of participants, which might be more easily achieved in the coming years by using new technologies (e.g., wearable sensors) and new analytical methods (e.g., big data) combining laboratory experiments with individual data collected on a daily basis.

Furthermore, there is currently a growing need for a comprehensive characterization of the mechanism of contingency detection as a result of a demand from developmental robotics to create intelligent agents capable of unsupervised learning. Indeed, the main source of learning used by development roboticists is the interaction between the agent and its environment. In this way, roboticists integrate into their algorithms contingency detection mechanisms similar to the ones observed in humans (Cangelosi & Schlesinger, 2015). This calls for the need for formalization of this mechanism and a precise understanding of its properties in immature agents such as babies. We hope that this paper will be useful to developmental psychologists and roboticists in their respective work and in the establishment of a common language required for the development of closer collaboration between the two fields.

Acknowledgments

The authors gratefully acknowledge the support of the EU funded FET-Open project “GOAL-Robots - Goal-based Open-ended Autonomous Learning Robots”, Grant agreement no 713010, and ERC Grant 323674 “FEEL”.

Chapitre 2

Sensorimotor contingencies as a key drive of development: from babies to robots

En révision à Frontiers in Neurorobotics, Special Issue: “Computational Models of Affordance for Robotics” (soumis en Juin 2019)

Abstract. Much current work in robotics focuses on the development of robots capable of autonomous unsupervised learning. An essential prerequisite for such learning to be possible is that the agent should be sensitive to the link between its actions and the consequences of its actions, called sensorimotor contingencies. This sensitivity, and more particularly its role as a key drive of development, has been widely studied by developmental psychologists. However, the results of these studies may not necessarily be accessible or intelligible to roboticists. In this paper, we review the main experimental data demonstrating the role of sensitivity to sensorimotor contingencies in infants’ acquisition of four fundamental motor and cognitive abilities: body knowledge, memory, generalization and goal-directedness. We relate this data from development psychology to work in robotics, highlighting the links between these two domains of research. In the last part of the article we present a blueprint architecture demonstrating how exploitation of sensitivity to sensorimotor contingencies, combined with the notion of “goal”, allows an agent to develop new sensorimotor skills. This architecture can be used to guide the design of specific computational models, and also to possibly envisage new empirical experiments.

Key words. Infant Development; Sensorimotor Development; Sensorimotor Contingencies; Goals; Unsupervised Learning

1 Introduction

Over recent years there has been growing interest in constructing robotic systems whose physical and cognitive competence evolves progressively in a way analogous to how biological systems, and in particular humans, develop in the womb and after birth. A variety of approaches to unsupervised learning are currently being investigated (c.f., e.g., Cangelosi & Schlesinger, 2015), but all of them share an underlying assumption, which is that the agent’s own action, often autonomously decided, must be used to progressively enrich the agent’s knowledge by probing the environment. In biological organisms the most basic type of such probing must occur already at the very beginning of development. Thus, for example in human fetuses and infants, the organism must be sampling the sensory effects of its actions, making use of these “sensorimotor contingencies” to construct its understanding of its own body, its sensory systems, and of its proximal and distal environment, including the social environment. Ultimately, it is assumed, sensitivity to sensorimotor contingencies will contribute to the establishment of socio-cognitive and motor skills (e.g., Gergely & Watson, 1996; Nagai & Asada, 2015; Tarabulsky et al., 1996; Verschoor & Hommel, 2017) like language (e.g., Goldstein & Schwade, 2008; Schwartz et al., 2012), reaching and grasping (e.g., Corbetta & Snapp-Childs, 2009) and walking (e.g., Adolph et al., 2000).

In robotics it is simply taken for granted that agents must be sensitive to sensorimotor contingencies, and research focuses on the details of how new cognitive, motor, and social skills are acquired. On the other hand, in developmental psychology, sensitivity to sensorimotor contingencies has itself been studied and documented. First, researchers have demonstrated that sensitivity to sensorimotor contingencies is already present in fetuses and newborns for stereotyped actions such as hand-mouth coordination (e.g., Myowa-Yamakoshi & Takeshita, 2006) or non-nutritive sucking (e.g., DeCasper & Spence, 1986), and then that it extends to other actions in the first months of life (e.g., Rovee & Rovee, 1969). Researchers have also tried to describe how sensitivity to sensorimotor contingencies contributes to the development of infants’ motor and cognitive functions. In this paper, we will focus on four examples (body knowledge, memory, generalization, and goal-directedness) which are central to development, and that we will address through the four following questions: Are infants able to identify the particular motor skills or body parts involved in a sensorimotor contingency? How long is a sensorimotor contingency retained in memory? To what extent are infants capable of generalizing a sensorimotor contingency to a new situation? Are infants able to use sensorimotor contingencies in order to attain desired states?

In what follows we will look at how these four questions have been experimentally addressed in developmental psychology — for reference, experimental methods used in the studies reviewed in this paper are summarized in Table 2.1. In each section, we will link infant data to the main computational and developmental robotics literature also reviewed in a prospective and critical way. Note that the “Approaches in robotics” sections do not claim to be exhaustive, but suggest

links between infant study findings and current work in developmental robotics. We close the paper by presenting a blueprint architecture directed to integrate the key elements of contingency-based learning from a robotics perspective. This can be used to guide the design of specific computational models and also to possibly envisage new empirical experiments (the architecture was introduced in [Baldassarre et al. \(2018\)](#)).

We are aware that remarkable work has already linked data from developmental robotics and developmental psychology (e.g., [Caligiore et al., 2014](#); [Cangelosi & Schlesinger, 2015](#); [Guerin et al., 2013](#); [Jamone et al., 2016](#); [Oudeyer et al., 2016](#)). The novelty of our approach is to focus on the mechanism of sensitivity to sensorimotor contingency itself (since as such it has not been a main focus of developmental robotics) and to illustrate with four examples how this sensitivity contributes to development. In our survey, we shall concentrate on studies involving babies under one year of age, where presumably the mechanisms involved in contingency detection would be easier to study, since they will be less likely to be masked by higher learning processes.

2 Body knowledge: Is the agent able to identify the particular motor skills or body parts involved in a sensorimotor contingency?

In a seminal paper, [Oudeyer et al. \(2005\)](#) imagined how a robotic agent (an AIBO robot), playing in the equivalent of a “baby gym”, could discover both the functioning of its own body, and also the actions that its immediate environment affords. This scenario is interesting because it can be applied both to robots and to human babies with respect to the question of the acquisition of body knowledge. Thus, one can imagine that the agent starts by doing random “motor babbling”. At every moment it activates a variety of effectors and receives feedback through its sensors from the environment. For example, the agent might by chance touch a bell suspended near it, and perceive a resulting auditory input. Its “intrinsic motivation” might then prompt it to attempt to replicate the sound by repeating the action it performed. By progressively refining its actions, will the agent be able to precisely identify the motor command that produced the bell sound? Will this ultimately allow the agent to acquire that command as a new implicit skill, thereby contributing to better distinguish its body parts?

<p>Procedures exploiting infants' sensitivity to sensorimotor contingencies mentioned in this paper</p>
<p>Operant conditioning procedure — Experiments in which an infant is exposed to a sensorimotor contingency, i.e., a particular action of the infant is reinforced by a “pleasant” sensory feedback. Experimenters measure the frequency of occurrence of the reinforced action before, during and after exposure to the sensorimotor contingency. There is a wide variety of operant conditioning procedures, those used in the studies cited in this article are:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Mobile paradigm — One limb (leg or arm) of the infant is attached with a ribbon to a mobile placed above the infant. Movements of the “connected” limb of the infant produce contingent movement of the mobile (audiovisual feedback). The infant’s limb movements are measured. Such a procedure is called a “conjugate reinforcement” as movements of the mobile are proportional to the infant’s movements. This paradigm was developed and intensively used with 3-4-month-old infants by Rovee-Collier and her collaborators. • Non-nutritive sucking — A non-nutritive pacifier is placed in the infant’s mouth. Sucking of the pacifier produces a contingent feedback (visual or auditory). Different features of the sucking behaviour can be reinforced (e.g., high amplitude sucking). The infant’s number of sucks and/or frequency of sucking are measured. This protocol has been mainly used with newborns and very young infants, since sucking is one of the first mastered motor skills. • Gaze contingency — One position of the infant’s gaze on a screen is associated with the appearance of a picture on the screen (at the same position or elsewhere). The location of the infant’s gaze on the screen is measured and the number of “reinforced gazes” is computed. The technique is effective because gaze movements are well controlled in infants from 4 months of age. • Button contingency (e.g., the train paradigm) — The infant pushes on a button to trigger an audiovisual feedback (e.g., motion of an electric train). The number of pushes on the button is measured. This protocol is used in infants older than 6 months since younger infants cannot easily use buttons.
<p>Means-end procedure — Experiments in which an action on an object triggers an effect on another part of the object or on another object (e.g., pulling a string to retrieve an out-of-reach toy). The purpose here is to measure the infant’s ability to differentiate between the means used (e.g., grasping the string) and the goal achieved (e.g., attaining the toy).</p>
<p>Revaluation procedure — Experiments in which the valence of a contingent feedback is modulated. In a first phase, the infant learns one (or two) action-effect couple(s). Then, the value of (one of) the contingent effect(s) is changed. After this relative change in valuation of the stimulus, it is assumed that the infant will have a strong preference for (one of) the contingent effect(s). At the end, the infant has the opportunity to execute the previously learnt contingent action(s) to obtain the associated effect(s). It is important to highlight that the contingent feedback is not displayed at this phase of the experiment in order to ensure that the infant’s choice of action is goal-directed (i.e., not stimulus-driven). The number of contingent actions realized by the infant is measured before and after the revaluation.</p>
<p>Buzzer procedure — Experiments in which a vibrotactile stimulation is applied on the infant’s body for several seconds at different locations. Motor response of the infant is measured (e.g., limb activity, reaction times, reach/grasp of the buzzer).</p>

Table 2.1 – Overview of the procedures used in the infant experiments mentioned in this paper.

2.1 Evidence from developmental psychology

2.1.1 Motor skill refinement

Researchers have investigated to what extent exploration of sensorimotor contingencies could lead infants to refine their motor skills. To do so, they have tested infants in modified versions of the “mobile paradigm” (see description in Table 2.1) in which movements which were not in the infant’s usual repertoire of actions generated the contingent feedback. For example, [Angulo-Kinzler et al. \(2002\)](#) tested 3-month-old infants and used knee extensions and knee flexions as triggering action. The authors showed that a few minutes after the beginning of exposure to the contingency, infants started to explore these non-usual leg movements. Interestingly, after a longer exposure, infants refined the necessary motor action and were able to make the actions in a more efficient manner. Similar observations were made in several other studies (e.g., [Angulo-Kinzler, 2001](#); [Chen et al., 2002](#); [Sargent et al., 2014, 2015](#); [Thelen, 1994](#); [Tiernan & Angulo-Barroso, 2008](#)), suggesting that infants’ exploration of sensorimotor contingencies might play a role in motor skill refinement. Developmental psychologists have also measured the influence of contingent feedback on the development of emerging skills such as reaching. The best known example is the “sticky mittens” experiment (e.g., [Needham et al., 2002](#)) in which 3-month-old babies who are not yet capable of reaching/grasping received two weeks of daily training sessions during which they carried mittens with Velcro attached to their fingertips, allowing them to pick up objects. After this training, babies that had had this new sensorimotor experience showed more (visual and oral) object exploration compared to non-trained babies. In another experiment, [Lee & Newell \(2013\)](#) exposed 10 to 16-week-old infants biweekly to a contingency between movements of one arm and auditory feedback. They found that this longitudinal intervention did not influence the moment in development when reaching emerged. However, they observed that compared to a control group, infants exposed to the contingency made more exploratory and “goal-directed” movements. Compatible with this, [Needham et al. \(2014\)](#) showed that 3-month-old infants were able to increase their reaching-like movements when these movements were contingently reinforced (here through the mobile paradigm, c.f. Table 2.1). This increase in reaching-like movements was observed during contingency exposure but also directly afterwards, when infants participated in a free-play experiment with a rattle. These results have been confirmed in a recent study by [Williams & Corbetta \(2016\)](#). The authors trained 3-month-old infants to reach for an object every day for two weeks. They found that infants for whom reaching movements towards the object generated contingent movements of the object, contacted the object significantly more than the control groups for whom reaching movements did not produce the contingent feedback.

2.1.2 Body part differentiation

In the previous paragraph, we showed evidence for an accumulation of implicit motor knowledge acquired through exploration of sensorimotor contingencies. This accumulation of implicit knowledge might lead infants to progressively differentiate between their body parts. Thus, one might expect that in the youngest infants, sensorimotor contingencies would not be specific to individual body parts, but rather that they would involve global body motions. However, as infants grow older one might expect that sensorimotor contingencies would narrow down to individual body parts. It is difficult to directly prove that there is such a causal link between accumulation of implicit knowledge provided by the detection of sensorimotor contingencies and body part differentiation. Below, we present what evidence there is more generally concerning the progressive differentiation of body responses over development.

Differentiation of body responses has been investigated in infants between 2 and 4 months of age by measuring their ability to narrow down a contingency to a specific limb, for instance to the limb connected to the mobile in the mobile paradigm (c.f. Table 2.1). Around 3 months of age, infants exposed to the mobile paradigm with one of their legs connected increase the movements of both of their legs and not the movements of their arms or even only the movements of their connected leg (e.g., Rovee-Collier et al., 1978; Heathcock et al., 2005). Going one step further, the team of Watanabe and Taga (Kato et al., 2013; Watanabe & Taga, 2006, 2009; Watanabe et al., 2011) investigated how differentiation of body responses evolves between 2 and 4 months of age, again using the mobile paradigm but connecting one arm of the infant to the mobile. Watanabe & Taga (2006) observed that 2-month-old infants increased activity of their four limbs equally, 3-month-old infants increased activity of both of their arms equally but did not increase the activity of their legs, and 4-month-old-infants increased the activity of their connected arm only. In another paper, Watanabe and Taga's team (Watanabe & Taga, 2009) showed that the moment when differentiation in body responses emerges differs depending on the body part involved. They found that 3-month-old infants with one arm connected increased activity of their arms only, but that infants of the same age with one leg connected increased the activity of their whole body. Interestingly, they proposed that this difference in response specificity might be explained by developmental differences in inhibitory abilities between arm and leg motor systems (Kato et al., 2013). D'Souza et al. (2016) have added a further interesting result by testing older infants' motor specialization during unimanual actions. More precisely, they measured the number of extraneous movements made by 9- and 12-month-old infants during play with a rattle. Here again, they found evidence for a progressive refinement of body knowledge, since extraneous "overflow" movements decreased with age.

Differentiation of body responses has also been investigated by measuring infant's responses to vibrotactile stimulation (cf. Table 2.1) (Begum Ali et al., 2015; Bremner et al., 2008; Chinn et al.,

2019; Hoffmann et al., 2017; Somogyi et al., 2018). In these experiments, authors measured the ability of infants to localize a vibrating buzzer on a specific body part. More precisely, authors measured both infants' implicit localizations — which limb was moved first or which limb was more active during the stimulation — and explicit localizations — looks/touches/grasps towards the buzzer. The authors found a developmental pattern: at 4 months of age infants seemed able to implicitly localize the tactile stimulation; at 6 months they became able to touch and/or grasp it and only at 10 months did they start to look at it. More interestingly for our purpose, Somogyi et al. (2018) found that the youngest infants' reactions (3 months of age) involved global body motions — i.e., the youngest infants moved their whole bodies during stimulation — whereas older infants' reactions (5-6 months of age) involved limb-specific body motions — i.e., older infants moved the stimulated limb more.

2.1.3 Conclusion from developmental psychology

The studies reviewed above suggest that exploration of sensorimotor contingencies allows infants to refine motor skills and to differentiate their body parts. Thus, in the first two months of life, detecting contingent actions involve general motor activity of the infant. Then, the third month of postnatal life appears to be a pivot in development: detected contingent actions become more integrated into the refinement of existing skills. This change at 3 months of age is also reflected in body differentiation: arms and legs seem more differentiated. One month later, body knowledge specialization seems to be even more effective, and limb differentiation seems to be achieved. Thus, body knowledge development, achieved through sensorimotor contingency detection, presumably brings infants to acquire a repertoire of well-defined actions, leading them to be ready at 3-4 months of age to develop reaching, grasping and later, tool-use abilities. Another point is worth noting: gradual maturation of inhibitory processes might also be involved in the progressive specialization of motor responses. The lack of inhibition in motor babbling may be a factor that prevents younger infants from easily making limb-specific actions¹. It may be the increase in inhibitory abilities that leads older infants to discover limb-specific actions.

2.2 Approaches in robotics

The work from Oudeyer et al. (2005) confirms that a simple robot equipped with what has been called “intelligent adaptive curiosity” can indeed acquire information about its body, at least information of an implicit type – that is, the agent gradually learns to use its body more effectively to explore its environment. Following the idea that understanding one's effects on the environment is crucial for the autonomous development of animals and humans (Berlyne, 1960; White,

¹Nonetheless, even newborns are able to display distinctive actions when they are in specific conditions (Grenier, 1981; van der Meer, 1997; van der Meer et al., 1995, 1996).

1959) a variety of work in robotics has focused on the autonomous learning of skills on the basis of the interactions between the body of the artificial agent and the environment, where robots are tested in “simple” reaching or avoidance scenarios (e.g., Hafez et al., 2017; Hester & Stone, 2017; Santucci et al., 2014a; Reinhart, 2017; Tanneberg et al., 2019) or in more complex tasks involving interactions between objects (da Silva et al., 2014; Seepanomwan et al., 2017), tool use (Forestier & Oudeyer, 2016) or hierarchical skill learning (Colas et al., 2018; Forestier & Oudeyer, 2017; Santucci et al., 2019), and even in imitation learning experiments (Duminy et al., 2018). When combined with the use of “goals”, intended here as specific states or effects that a system is willing to obtain, curiosity and intrinsic motivation are able to properly guide task selection (Merrick, 2012; Santucci et al., 2016) and reduce the exploration space (Baranes & Oudeyer, 2013; Rolf et al., 2010).

On the other hand, the relation between sensorimotor contingencies and the development of early body knowledge per se is still poorly studied in robotics. Hoffmann and colleagues in different studies have underlined how the development of the body schema may improve the functioning of artificial agents (Hoffmann et al., 2010; Roncone et al., 2014), as well as how robots can be used to model early sensorimotor development (Hoffmann et al., 2017; Hoffmann & Pfeifer, 2018). The way peripersonal motor maps can help robot learning has been studied in Jamone et al. (2014). Mannella et al. (2018) presented a specific hypothesis on the learning of sensorimotor contingencies in relation to the gradual acquisition of the knowledge of the agent’s own body driven by intrinsic motivations. In particular, a simulated robotic model of a torso with two arms is free to move around with its effectors. Whenever a new contingency is discovered (here the self-touch generated by the hands colliding with the body) the robot systematically attempts to replicate the contingency, thus acquiring new motor skills and at the same time forming an internal map of its own body on the basis of the touch events that it perceives during the experiment. The blueprint architecture introduced below represents the theoretical framework within which this model was developed. Similarly, Juett & Kuipers (2019), using a Baxter robotic platform, studied how visual sensorimotor contingencies are a key element in developing the robot’s knowledge of its own body and the way it relates to the environment.

3 Memory: How long is a sensorimotor contingency retained in memory?

Returning to Oudeyer et al. (2005) example of the agent in its baby gym, let us imagine that yesterday it discovered a new contingency: for example, touching a bell to generate a sound. When returning to the baby gym today, will the agent remember what it learned yesterday, or must it relearn the contingency from scratch? And how does this depend on the delay since first

encountering the contingency? How does practice in the interim affect recall?

3.1 Evidence from developmental psychology

Rovee-Collier and her team are the authors who have contributed extensively to the question of memory of sensorimotor contingencies. Their studies involved infants from 2 to 18 months of age in an experimental framework consisting in training infants for two or three days with a sensorimotor contingency that involved 6 to 9 minutes of exposure on each training session, and then in testing infants' retrieval of this contingency after different delays: from one day to a few months after training ended. In addition, in some of their studies they reactivated the learning between training and testing through a brief exposure to the contingent stimulus or to the context in which learning occurred. The paradigm they used was the mobile paradigm with infants aged less than 6 months, and the "train" paradigm with older infants (c.f. Table 2.1).

3.1.1 Retention

One of Rovee-Collier and her colleagues' lines of research was the retention of sensorimotor contingencies (e.g., Sullivan et al., 1979). Rovee-Collier and her colleagues showed that one day after training with the mobile, infants of all ages were able to retrieve the contingency. However, for longer delays, the retrieval was dependent on the age of the infant: the duration of retention increased progressively from one day to 3 months, as the age of the infant increased from 2 to 18 months of age (see Rovee-Collier, 1999, for a review). It is worth noting that infants' retention can be modulated by the training schedule. For example, for the same amount of training — 18 minutes — 2-month-old infants' retrieval of a contingency increased from one day to two weeks when the training was spread over three days instead of two days (Rovee-Collier, 1999).

3.1.2 Reactivation

In another series of experiments, Rovee-Collier and her colleagues introduced a "reactivation treatment" (priming) one week (or two) after the infant had forgotten the contingency (e.g., Fagen & Rovee-Collier, 1983). This reactivation consisted in three minutes of exposure to the original mobile/train or to the original environment used previously (e.g., testing room, color of the infant's crib). They found that both these modes of reactivation enabled infants aged 3 months and older to again retrieve the forgotten contingency. The authors found that the temporal course of forgetting after reactivation was similar to the temporal course after training: forgetting increases with delay. Moreover, the reactivation treatment becomes effective more quickly as age increases: while young infants need around 24 hours for the reactivation treatment to become effective, it becomes effective immediately for infants that are 12-months-old or older (Rovee-Collier, 1999). The delay needed to obtain this reactivation increases logarithmically over the first year of life.

Also, the time of exposure needed to obtain reactivation decreases, going from 2 minutes at 3 months of age to 1.8 seconds at 12 months (Rovee-Collier, 1999).

3.1.3 Conclusion from developmental psychology

Take home messages from these studies are that (i) from very early in life (2 months of age), babies are able to remember a contingency one day after exposure, (ii) the duration of retention increases gradually to as much as 3 months after exposure in the first year of life, and (iii) long-term retention of a contingency is enhanced by as little as a few minutes of reactivation of the contingency. Interestingly such reactivation does not require practicing the contingency, but only perception of the stimulus involved in the contingency (e.g., seeing the mobile moving in a non-contingent manner) (e.g., Rovee-Collier et al., 1980). Thus, one might suggest that young infants create something like an "inverse model" of contingencies they are exposed to, since they are able to activate an entire contingency from its stimulus only. Moreover, it is worth noting that retention abilities of infants are enhanced when learning is spread over several days, suggesting that maybe, even in very young babies, sleep might help in consolidating sensorimotor learning (see Gómez & Edgin, 2015, for a review).

3.2 Approaches in robotics

Studies in artificial neural networks and robotics may shed some light on the memory processes illustrated above. First, modelling through artificial neural networks allows the specification of the mechanisms behind the memorisation processes. Neural network studies on learning processes have shown that the ways in which neural networks can "memorise" experience are multiple and can be grouped into three broad categories depending on the source of the output to be associated to the (perceptual) input: supervised learning, unsupervised learning and reinforcement learning. In supervised learning the output is provided to the agent by an external teacher or by another internal component (Bengio et al., 2016). In unsupervised learning the output is the result of algorithms that identify different possible statistical regularities in the sensory input (e.g., as in self-organising maps, Kohonen, 2001). Finally, in reinforcement learning the output is actively searched for by the agent using active exploration of the environment while attempting to maximise a reward measure having either an external or an internal origin. Among the three classes, reinforcement learning is clearly closer to contingency-based learning since it captures the fact that learning relies on free exploration of the environment and since contingent events would seem to be eligible to produce the reward signals needed to guide the learning process. These features are indeed at the core of the blueprint architecture presented below.

Once a memory is formed, it may undergo forgetting processes. One might wonder if the memory decay observed in infants is detrimental or advantageous for cognitive processing. Com-

putational studies offer hypotheses for both cases. One explanation of memory loss might be that when new experiences are acquired, these might impair the existing memories from previous experiences (“catastrophic interference”, French, 1999). The fact that robustness of infants’ memories differs at different ages might reflect the fact that initially their memories are stored in a broader overlapping unspecific way that makes them more vulnerable to interference from new experiences (we are not aware of any model studying this). On the other hand, memory loss might be beneficial in facing the very important problem of “overfitting”, i.e., the tendency to memorize irrelevant aspects of experience that have no informative value. Interestingly, some of the most important solutions to this problem within the computational literature, called “regularization” mechanisms, rely on some form of forgetting (Bengio et al., 2016). Intuitively, regularisation mechanisms allow the system to release memories that correspond to rare aspects of experiences (irrelevant noise is usually of this type) and to retain the important “structure” of information that tends to repeat across different experiences.

4 Generalization: To what extent is the agent capable of generalizing a sensorimotor contingency to a new situation?

Imagine now that someone had changed the carpet of the baby gym from red to green. How is the agent’s behaviour affected by this change in the background context? Is the agent able to generalize its prior learning? And what if the objects themselves in the gym had been changed, instead of the background color?

4.1 Evidence from developmental psychology

Generalization within the framework of sensorimotor contingencies would be the ability to transfer a contingency learned in one, original, set of conditions to a new situation. Experiments designed to test this have considered cases when the new situation differs from the original situation by a change in the stimulus and/or in the context.

4.1.1 Changes in stimulus

The effect of changing the stimulus was extensively investigated during the late 60’s and 70’s using the non-nutritive sucking paradigm (see Table 2.1). At that time, researchers were interested in infants’ discrimination abilities. They noticed that in non-nutritive sucking experiments, infants progressively lost interest in the visual or auditory stimulus generated by their sucking (this is known as habituation, see for ex. Aslin (2007) for a recent review on visual habituation). Interest-

ingly, if the stimulus was then changed to a new stimulus, infants' interest increased, as reflected by an increase in their sucking rate. Results from these experiments suggest that infants are able to generalize their learning of contingency to a new stimulus when the change occurs immediately after learning (e.g., Siqueland & Delucia, 1969).

The effect of changing the stimulus was also explored by Rovee-Collier and her collaborators in 2- to 12-month-old infants using the mobile paradigm (see Table 2.1) (see Hartshorn et al., 1998; Rovee-Collier, 1999, for review). They observed that young infants — 2 to 6 months of age — could not transfer their learning of a contingency to a novel stimulus (i.e., a different mobile) when they were tested one day after training with this new stimulus. In contrast, older infants — 9 and 12 months of age — could easily transfer the learning of a contingency between a lever and the movements of a toy train to a novel train when they were tested on the next day and up to 2 weeks later but not for longer delays (3 to 8 weeks). Rovee-Collier's team (Butler & Rovee-Collier, 1989) also tested generalization abilities of infants when both stimulus and context were changed simultaneously. They found that in this case infants were not able to generalize their learning even when they were tested only one day after training. This result is in line with what had been found previously — i.e., changes in stimulus strongly impair generalization abilities. Moreover, Rovee-Collier and her collaborators (Fagen & Rovee, 1976; Mast et al., 1980) explored the ability of 3-month-old infants to generalize their learning when quantitative aspects of the contingency were changed. They trained infants with one mobile and then switched to another mobile that provided weaker or stronger visual feedback (they did this by changing the number of components of the mobile). They found that even though infants noticed the change and reacted negatively, they were still able to generalize their learning and even to adapt their kicking rate to maintain the original amount of visual feedback.

These studies show that younger infants have greater difficulty transferring their learning to a novel situation compared to older infants. But the question then arises of exactly what degree of difference makes for a “novel” situation? It seems that for young infants, very little change produces a “novel” situation. For instance, in the mobile paradigm, young infants were not able to generalize their learning as soon as a few components (one to three out of five) or the symbols painted on the mobile were changed (e.g., Adler & Rovee-Collier, 1994; Fagen & Rovee, 1976; Hayne et al., 1986). Nevertheless, Rovee-Collier and her collaborators found four specific situations in which infants were able to generalize their learning to a novel stimulus (see Hartshorn et al., 1998, for a review). The first situation is when the novel and the original mobile share some visual features to which the infant selectively attends. The second situation is when the infant has forgotten the specific details of the original mobile. The third situation is when the infant is trained with a series of different mobiles. The fourth situation is when the infant is exposed to a novel object in motion after training is completed.

4.1.2 Changes in context

Regarding the effect of changing the environment (e.g., testing room, color of the infant's crib), Rovee-Collier and her collaborators (see Hartshorn et al., 1998; Rovee-Collier, 1999, for reviews) studied this on infants aged 3 to 18 months of age. They showed that when tested one day after training, both young infants — 3 to 6 months of age — and older infants — 9 to 12 months of age — were able to transfer their learning to a new context. This ability remains stable for delays longer than one day, and up to one month for older infants (9-12 months) but not for young infants (3-6 months). Thus, it seems that young infants are strongly sensitive to the context in which they learned a contingency. Moreover, what is considered as context in the infant's learning is not only nearby and very salient cues but also the more global environment. For example, Hayne et al. (1991) trained 3-month-old infants in a portable crib in their bedroom, and then tested the infants in the same crib with the same mobile but in a different room. They found that infants did not show retrieval of the contingency when they were tested in a different room. Hartshorn & Rovee-Collier (1997) found the same results with 6-month-old infants using the train task. Nonetheless, as for a change in mobile, the failure in generalizing learning to a new context can be overcome by training in multiple contexts (e.g., Rovee-Collier & Dufault, 1991).

4.1.3 Conclusion from developmental psychology

It appears that over the course of development infants' ability to generalize from one contingency to another increases gradually. While at first learning of sensorimotor contingencies is strongly impacted by the specific features of the contingent stimulus and by the context, learning becomes progressively more tolerant to stimulus and context changes during infants' first year of life. This tolerance does not correspond to a decrease in infants' ability to discriminate between the original and the new stimulus/context. Rather, it may reflect an increase in infants' ability to recognize two situations as functionally equivalent and then to apply what they have previously learned in one situation to another one. Interestingly, this ability seems to emerge at the time when infants become self-locomoting (around 9 - 12 months of age with crawling and then walking), suggesting that infants become able to separate what has been learnt from the associated details/context only when they become able to spatially explore the environment by themselves (Rovee-Collier, 1996; Herbert et al., 2006).

4.2 Approaches in robotics

Generalisation, the ability to respond to patterns and situations different from those previously experienced, is an appealing feature of neural-network models (McClelland et al., 1986), in particular when compared to “symbolic systems” (Russell & Norvig, 2010). Generalisation ranges from the

ability to keep responding when the main stimulus is slightly novel to the ability to keep responding when both the main stimulus and the context are very different. Regarding generalisation over stimuli, research with computational models explains some of the observations of Rovee-Collier and colleagues on infants. In particular, the fact that the exposure to a large number of stimuli facilitates generalisation is in line with one of the most important principles of neural networks, according to which increasing the size of the dataset used to train networks greatly benefits their generalisation capabilities (Bengio et al., 2016). The reason for this is that important information tends to be present in all stimuli and so to be encoded, whereas irrelevant information due to noise or secondary features is much more variable and so tends to change connection weights in opposing directions and thus to not be encoded. With few experiences of stimuli, this mechanism is impaired as both important and irrelevant information is encoded thus resulting in poor generalisation. This process might also explain the result for which infants can generalise based on the fact that they have forgotten the specific details of the original mobile (e.g., Rovee-Collier & Sullivan, 1980).

The design of neural models having generalisation capabilities that are robust with respect to substantial stimulus/context changes is an important investigation known as transfer learning. This can involve either perceptual processes (Pan & Yang, 2010) or motor processes (Tommasino et al., 2016; Taylor & Stone, 2009). Transfer problems involve situations where the system learns some “source tasks” and has the opportunity to use the gained knowledge to solve new “target tasks”. The possibility of knowledge transfer depends on the similarity between the context and stimuli of the source and target tasks, and higher similarity enhances transfer. Such “similarity” however depends on the level of abstraction with which the context and stimuli are internally represented, in particular higher abstraction implies higher similarity. This might explain why older infants have an enhanced capacity to reuse acquired knowledge in novel situations: younger infants perceive reality through low-level features, so new situations appear to them as completely novel. On the other hand, older infants perceive reality through higher-level, more abstract features that make situations memorable with already acquired knowledge and skills.

A trend in the study of artificial neural networks involves the proposal of systems having increasing ability to disentangle elements of the scene (e.g., objects) from the context. Work on these systems offers possible interpretations of the fact that infants’ capacity to recall knowledge on contingencies in different contexts increases with age. Generally, neural networks and robots engaged in recognizing objects process the whole scene. Currently the most advanced systems that do this, convolutional neural networks, automatically parse the image into regular sub-parts (local fields) and repeat the same processing on each of them (Bengio et al., 2016). Recently, the literature has proposed “regional convolutional neural networks” that do not process all parts of the image regularly, but actively focus on a small number of them that might provide richer information, thus leading to improved performance (see Maiettini et al., 2018, for a review). This process (e.g.,

for object recognition) is analogous to overt attention that in humans directs the gaze on salient areas of the scene (Marraffa et al., 2012; Wang et al., 2012). Here generalisation is explained by the fact that irrelevant aspects of the scene are ignored altogether (Ognibene & Baldassare, 2015). Compatible with these ideas, it could be that, at an early age, infants process the whole scene without being able to isolate single elements of it. With development, they might then develop the capacity to focus on limited portions of the scene so that the perception and hence memorisation of contingencies is more effective (in parallel, memory structures might themselves become more robust).

5 Goal-directedness: Is the agent able to use sensorimotor contingencies in order to attain desired states?

When the agent (robot or baby) is exploring its baby gym, how does it decide what to do next? Does the agent have in mind a nice sound that it would like to hear? If yes, does this representation of the sound prompt the agent to touch the bell? Or on the contrary, does the agent need to actually see the bell again in order to touch it and produce the sound? In other words, are the agent's actions goal-directed?

5.1 Evidence from developmental psychology

The first issue in answering these questions resides in the definition of goal-directedness (see [Kenward et al., 2009](#), for more detail on different views of goal-directedness). In developmental psychology, goal-directed actions are frequently described with respect to motor planning. An action is considered as goal-directed if the motor sequence is organized with respect to an object, an agent, a gesture or a posture ([von Hofsten, 2004](#)). With this definition, goal-directed actions would seem to be already present in very young infants (see, e.g., [Rochat & Striano, 2000](#); [von Hofsten, 2004](#)). In what follows here, we will characterize goal-directedness with respect to decision-making ([Dolan & Dayan, 2013](#)). More precisely, we will adopt the framework developed by Baldassarre and his collaborators ([Santucci et al., 2016](#)), where a goal is defined as a specific state of the world, and a goal-directed action is defined as an action made by an agent to attain this specific state of the world. Hence, to make a goal-directed action, the agent needs to possess two abilities: the ability to select a goal (i.e., a desired state of the world) and the ability to make the action that gives rise to the selected state of the world in the current context. This second ability implies that the agent has previously learned the contingent link between the selected goal and the action. One might say that the agent must have learned the "inverse model" of the contingency with regard to the context. Tackling the question of goal-directedness with respect to decision-making in infancy is challenging because cognitively demanding paradigms from the decision-making literature cannot

be used (see [Dolan & Dayan, 2013](#), for a review of these paradigms and [Decker et al., 2016](#), for an attempt of implementation in a child experiment). Nevertheless, developmental psychologists have developed several strategies to explore goal-directedness: (i) means-end behaviours, (ii) anticipation abilities, (iii) bidirectionality of contingency, and (iv) “representation” of the action-outcome coupling. Exceptionally in this section we will discuss data involving infants older than 1 year as a reference for comparison to goal-directed behaviour in younger infants.

5.1.1 Means-end behaviours

A first way researchers have studied goal-directed actions in infants was by looking at infants’ ability to act on an object when this generates an effect on a second object — for example, pulling a support/string to retrieve an out-of-reach object or pushing a button to activate a device (e.g., [Munakata et al., 1997](#)). Such abilities are referred to as “means-end behaviours”. Infants are for example reported to solve the simplest tasks, such as selecting a lever, around 5-6 months of age (e.g., [Lobo & Galloway, 2008](#)) and to discover the pulling effect around 7-9 months of age (e.g., [Babik et al., 2018](#); [Munakata et al., 1997](#); [Willatts, 1999](#)). Many developmental psychologists (e.g., [Diamond, 1991](#); [Piaget, 1936](#); [Willatts, 1999](#)) consider these early means-end behaviours as evidence for “intentionality” and goal-directedness in young infants. Nevertheless, as mentioned previously, certain apparent means-end behaviours could actually simply be stimulus-driven, meaning that the infants associate the view of the object with the pulling/pushing action without the notion of goal being involved (reinforcement learning). One method used to overcome this ambiguity is to offer the infant a choice between a set of potential “means” objects, among which only one allows the “end” object to be retrieved (e.g., a set of strings in which only one is attached to the out-of-reach object). With this protocol, it seems that young infants have great difficulties in choosing the effective “means” object, and if one considers that solving such a multiple means-end problem is a proof of goal-directedness, it seems that goal-directedness is only acquired during the second year of life (e.g., [Paulus & Sodian, 2015](#); [Rat-Fischer et al., 2014](#)). The acquisition of goal-directedness has also been studied through investigation of the baby’s understanding of other people’s means-end behaviours (e.g., [Carpenter et al., 2005](#); [Elsner, 2007](#)). Some authors have argued that babies have the ability to perceive other people’s actions as intentional from an early age, and that they are able to use this early teleological reasoning to selectively imitate other people’s actions (e.g., [Gergely et al., 2002](#)). However, some authors have questioned the precocity of babies’ ability to perceive the actions of others as intentional (e.g., [Paulus et al., 2013](#)) and have argued that this ability develops gradually during the first years of life as a function of the baby’s sensorimotor experience (e.g., [Sommerville et al., 2005](#)) — see [Paulus & Király \(2013\)](#) for a review.

5.1.2 Anticipation abilities

Going a step further in the study of goal-directedness, developmental psychologists have investigated infants' ability to anticipate the appearance of a contingent feedback that follows after realizing an action. Wang et al. (2012) explored this question on 6- and 8-month-old infants using a gaze contingency set-up. In their experiments, infants could activate the appearance of a picture in the middle of the screen by looking at a red disc located on one side of the screen. The authors measured the extent to which the infant anticipated the appearance of the picture — namely if the infant started to look at the middle of the screen directly after looking at the contingent disc but before the appearance of the picture. They found that at both ages, infants were able to learn the contingency to anticipate the contingent feedback. Along the same lines, Kenward (2010) found that 10-month-old infants were able to anticipate the appearance of a video generated by pushing a button. Adopting the assumption that anticipation of an action's effect means that this action was goal-directed, one might consider that infants are able to make goal-directed actions from at least 6 months of age. Nevertheless, anticipation paradigms do not guarantee that infants are capable of goal selection. Indeed, one might argue that when an infant anticipates the consequences of its actions, this does not mean that the infant has selected this action to obtain a desired goal (contingent feedback). Instead, the infant could have learnt the contingency by reinforcement learning without any use of the notion of goal. With the aim of obviating this weakness of anticipation paradigms, developmental psychologists have used a paradigm coming from the animal literature and more effectively testing goal-directedness: the revaluation paradigm (see later). But before addressing this issue, a simpler question to ask is: to what extent is infants' sensitivity to sensorimotor contingencies bidirectional?

5.1.3 Bidirectionality of contingency learning

Infants' ability to identify an action from its effects has mainly been investigated by Verschoor and his colleagues (Verschoor et al., 2013, 2010). In Verschoor et al. (2010), the authors first exposed 9-, 12- and 18-month-old infants to two sounds: one sound was self-produced by the infant by touching a panel and the other sound was independent of the infant's behaviour. Then, the authors measured infants' propensity to realize the contingent action (i.e., touch the panel) after presentation of the contingent or the non-contingent sound. The authors found that infants at all ages were faster to produce the contingent action in response to the contingent sound than to the non-contingent sound, suggesting that from 9 months of age, infants are able to identify an action from its effects. In their second study (Verschoor et al., 2013), the authors exposed 7-, 12-month-old infants (and adults) to two contingencies, each associating respectively a right and a left saccade to a different sound. Then, they measured participants propensity to make the "good" contingent action (right or left saccade) after being exposed to its previously learnt effect (one

of the two sounds). They found that the older infants (12 months of age) and adult were able to identify an action from its effect whereas younger infants (7 months of age) were not able to do so. Interestingly, they found that both 7- and 12-month-old infants were surprised when they made the “wrong” action, suggesting that 7-month-old infants formed bidirectional knowledge of the contingencies but were not able to use this knowledge in action selection.

5.1.4 “Representation” of the action-outcome coupling

The studies presented above suggested that after 9 months of age, infants are able to “predict” the consequences of their actions and to identify an action from its effects. However, one question remained open: Are infants able to represent a desired effect in their mind, and to make an action in order to obtain this effect? To investigate this question, developmental psychologists have used the revaluation paradigm (see Table 2.1 for a description). [Klossek et al. \(2008\)](#) tested to what extent infants’ sensitivity to the revaluation paradigm evolves in the second and third year of life. They tested three groups of infants: 16 to 27, 27 to 37 and 37 to 48 months of age. All age groups were able to learn two contingencies in an acquisition phase and were sensitive to revaluation (i.e., inducing a preference for one of the stimuli generated by the contingent actions). But, interestingly, in a test phase, only the two older groups of infants, from 27 to 48 months of age, were able to show their preference in stimulus (goal selection) by making the correct action (action selection). This last result means that the infants younger than 2 years of age were not able to make goal-directed actions, and remained predominantly stimulus-driven in their behaviours. To ensure that this inability to make goal-directed actions in younger infants was not due to the complexity of the task, [Kenward et al. \(2009\)](#) developed a simplified version of the revaluation paradigm. In their set-up, the infants had to learn only one contingency in the acquisition phase. Then, for one group of infants (the revaluation group) the stimulus used as contingent feedback in the acquisition phase was increased in value, while a control group were occupied by an independent irrelevant task. In the test phase, infants’ propensity to repeat the contingent action in the absence of feedback was compared between the revaluation and control groups. The authors tested infants of three ages 14, 19 and 24 months. Here again, the authors found that infants at all ages were able to learn the contingency in the acquisition phase and were sensitive to the revaluation. But the authors observed that only at the oldest age (24 months), did infants trained in the “revaluation group” show a higher number of contingent actions during test compared to the control group. If one accepts that the revaluation paradigm is a test of goal-directedness, it seems that infants only become able to use goals to select their actions after 2 years of age.

5.1.5 Conclusion from developmental psychology

Taken together these studies suggest that infants' ability to make goal-directed actions emerges progressively during the first three years of life. Young infants (before approximately 9 months of age) seem sensitive to sensorimotor contingencies, and even seem able to predict the consequences of their actions, but without being able to use this knowledge in order to select their actions. Thus, they are capable of goal selection (since they can develop a preference for a stimulus) but not of action selection. Then, at the end of their first year of life, infants become able to select their actions in a stimulus-driven fashion, since they can recall an action when they first perceive the stimulus (e.g., move to make a static mobile move) but not when they have to cause presentation of the desired stimulus (e.g., obtain a specific sound). Finally, at the end of their second year of life, infants become able to select an action in order to attain a desired (and not necessarily currently perceived) state of the world. Thus, one might conclude that it is only at this age that infants become really capable of model-based decision making. Note that this progressive pattern of acquisition might possibly be related to the progressive acquisition of inhibitory abilities in infancy.

5.2 Approaches in robotics

Computational modelling confirms that observing anticipatory behaviour like that observed in the gaze contingency experiments of Wang et al. (2012) does not imply that the infants are goal-directed. In this respect, Marraffa et al. (2012) presented a model that mimics the behaviour of the infants when tested in a simulated version of the set-up used in the experiment of Wang and colleagues. Like the infants, the model learns by reinforcement learning to gaze at salient parts of a (simulated) screen to cause the appearance of a rewarding image. The model incorporates bottom-up and top-down attention mechanisms that allow it to learn as fast as real infants. The model also exhibits the same anticipatory gazing behaviour as the infants. This is explained by the fact that with learning as soon as the simulated infant sees the cue associated with the appearance of the image, it immediately looks at the place where the image will appear as this is the place to look at to receive the reward. Of course, this only shows that reactive behaviour and reinforcement learning are sufficient to produce the anticipatory behaviour seen in infants, but does not rule out the possibility that they rely on goal-directed mechanisms. Regarding the experiments of Verschuur and colleagues (Verschuur et al., 2013, 2010) on the bidirectionality of contingency learning, in future work it would be interesting to check which mechanisms are needed to reproduce the observed behaviours and whether they represent a precursor of more sophisticated goal-directed processes.

While goals are a fundamental element in classic artificial intelligence planning systems (Russell & Norvig, 2010), their use in robotic and machine learning neural-network systems has been limited

by the fact that the focus is usually on the solution of only one user assigned task. In this context, goals have been used only recently to face situations involving multiple tasks where robots need to decide on which of them to focus (Hart & Grupen, 2011; Santucci et al., 2012). In particular, in developmental robotics goals are crucial to support the learning of autonomous agents as they allow them to decide on which task to focus on the basis of intrinsic motivations (Santucci et al., 2012). Moreover, goals are also important to explore the task space (Cartoni & Baldassarre, 2018; Nair et al., 2018) and, as described in the framework of goal babbling (Rolf et al., 2010), they can possibly contribute to reduce such space thereby avoiding the “curse of dimensionality” problem (Bishop, 1995). On this basis, different artificial agents have been proposed that are able to autonomously discover and select their own goals and use them to drive the learning process (e.g., Baranes & Oudeyer, 2013; Seepanomwan et al., 2017). While it can be complicated to identify goal-directed processes in very young babies, robotic systems such as GRAIL (Santucci et al., 2016) are endowed with the possibility of storing and explicitly selecting interesting possible environment states, thus turning them into goals that can determine action selection and skill learning. These robotic models suggest that the possibility of performing goal-directed behaviour should go hand-in-hand with the possibility of forming representations of objects/states/events that can be reactivated in the absence of corresponding entities in the world. This allows an agent to act so as to increase the chance of obtaining “desired outcomes” (goals). This ability has to be paired to a “goal-matching” ability that compares the actual state of the world with the pursued goal so as to detect when it is achieved: this mechanism is a possible way to computationally operationalise how contingency detection might guide the acquisition of skills, as illustrated in detail in the following section.

6 Blueprint architecture: a theoretical integration of the elements of contingency-based learning

In the previous sections we have considered multiple elements involved in contingency-based learning. We now consider a “blueprint architecture” representing a theoretical scheme that integrates these elements in a whole framework (Figure 2.1). A first version of the architecture was proposed in Baldassarre et al. (2018). The architecture proposes a possible specification of the contingency-based learning mechanisms and processes considered this far, and also adds to them further mechanisms needed to have a fully autonomous agent. The value of the architecture is that it proposes a possible way to integrate such processes, thus offering a coherent view of how they could work together. The architecture can also inform the construction of specific computational models, as was done in Mannella et al. (2018).

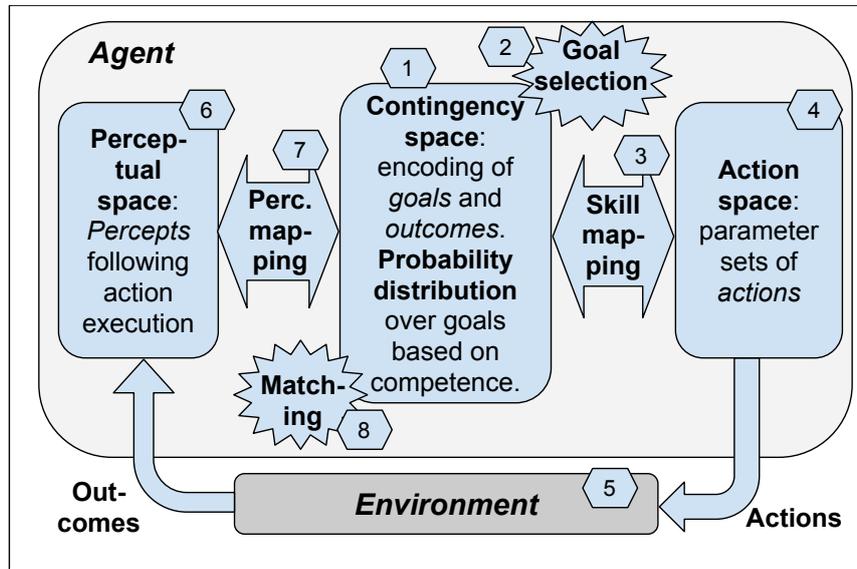


Figure 2.1 – The blueprint architecture incorporating our hypothesis about the key elements underlying open-ended learning of multiple skills. Boxes: the components of the architecture. Numbers: sequence of processes happening in one trial of functioning of the system.

The architecture is based on the hypothesis that contingency-based learning encompasses general mechanisms able to support the self-generation of goals, the encoding of the perceptual consequences of actions, and the learning of actions of any level of complexity, e.g., from moving a single finger to performing grasping with the whole hand. To illustrate the architecture, we will focus on a case involving learning to reach parts of the agent’s own body, a relevant form of knowledge that infants acquire soon after birth. However, we hypothesise that analogous contingency-based learning processes might support the acquisition of more sophisticated classes of goals and actions.

A key idea at the core of the architecture is that contingency-based learning relies on a specific type of events that are internal to the agent and reflect the sensorimotor contingencies happening in the environment, i.e., the motor action performed by the body and the physical consequences that it causes in the environment. These events, called “matching events”, correspond to a match between the selected goal encoding (encoding of the desired perceptual effect of the action), and the outcome encoding (encoding of the actual perceptual effect of the action). For example, intrinsic motivation might lead an infant to select the goal of touching a part of her chest. The goal activation might trigger the performance of an action directed to accomplish it. The performed action leads to a perceived effect in the environment (e.g., feeling of body touch). The perceived effect is internally represented in the brain and may or may not match the representation of the pursued goal. In case of “success” (the action produced the desired outcome), the matching event plays a crucial role in the architecture as it contributes (a) to modify the intrinsic motivation that leads to goal-selection, and (b) to guide the learning of perceptual mapping, the learning of the

skill mapping, and a learning process leading to align the goal encoding and the outcome encoding within the contingency space. We now review these processes in more detail.

The architecture is formed by the following main components:

- (a) Contingency space: a set of vectors (e.g., related to the possible activations of a group of neurons; the vectors are the points forming the space) each of which can represent two things: (1) a goal encoding the desired perceptual effect of the action triggered by the goal (where the “perceptual effect” can involve proprioception, perception of the outer world, or both); (2) the encoding of the actual effect resulting from the performance of an action. Importantly, as discussed below, the system aims to progressively drive each goal (encoded in the contingency space) closer to the outcome (as encoded in the contingency space) of the action triggered by the goal. The contingency space can be either discrete or continuous.
- (b) Goals: points of the contingency space that represent desired perceptual effects of actions, and can be internally selected and activated to trigger the related action.
- (c) Goal probability distribution: a probability distribution over goals, used to select the goal to pursue, and that depends on intrinsic motivations.
- (d) Skill mapping: mapping from the selected goal within the contingency space, to the action directed to pursue it.
- (e) Action space: set of action parameters where one parameter combination represents one action that can be selected by the skill mapping.
- (f) Perception space: set of sensor encodings of the possible effects (outcomes) caused by actions in the environment.
- (g) Perception mapping: mapping from the percepts resulting from action performance to their encoding within the contingency space.

The architecture works and learns in trials, and for each trial the following processes take place (see Figure 2.1, numbers in hexagons):

- (1) Initially the skill mapping and the perception mapping are randomly initialised so the points in the contingency space have random correspondences to the actions encoded in the action space and to percepts encoded in the perceptual space.
- (2) At the beginning of each trial the agent selects and activates a goal in the contingency space on the basis of a certain probability distribution explained below.

- (3) The skill mapping generates an action parameter set encoded in the action space.
- (4) The agent performs in the environment the action corresponding to the selected parameter set.
- (5) As an effect of the action, the environment changes into a certain state (outcome).
- (6) The outcome is encoded as a point in the perceptual space.
- (7) The point in the perceptual space corresponding to the action outcome is encoded into a point in the contingency space that constitutes the internal representation of the outcome.
- (8) The internal outcome representation can match the goal or not (if the contingency space is discrete), or it can have a certain degree of similarity with it (if the contingency space is continuous). This allows the computation of a matching signal: this signal has a discrete value in 0, 1 in the case the contingency space is discrete, or a continuous value within $[0, 1]$ in the case the contingency space is continuous (in this case it is computed on the basis of a suitable outcome/goal metric).

The matching value is used to determine the probability distribution over the goals that supports the selection of the goal to pursue (number 2 in the figure). The probability distribution is generated on the basis of intrinsic motivations, for example related to competence (e.g., the goals with a lower competence, or with a higher competence-improvement, have a higher probability of selection; Santucci et al. (2013)). The matching value is also used as a learning signal to drive the learning processes involving the perceptual mapping and the skill mapping. In particular, it is used as a reward to: (a) find the action parameters by reinforcement learning, and use them to update the skill mapping; (b) update the perceptual mapping so that the percepts that are similar in the perceptual mapping connect to similar points in the contingency space; (c) at the same time, update the perceptual mapping and the skill mapping so that the internal outcome representation matches, or becomes more similar, to the goal representation. Through these learning processes, the internal outcome representation and the goal representation tend to align, i.e., each goal tends to produce an action that causes an outcome in the world that once perceived is encoded in a point in the perceptual space that matches the goal. Through these processes, the agent discovers the possible outcomes that it can produce in the environment, learns to encode them in the contingency space, and acquires the motor capabilities needed to accomplish such outcomes when desired.

An issue not considered this far involves the agent's capacity to understand that a certain effect observed in the environment is caused by the agent's own action and not by the spontaneous evolution of the environment or by other agents. In this respect, we have so far assumed that all the effects that the agent observes are caused by its own actions. This is a good assumption in some

conditions (imagine an infant exploring her body while in the cradle) but not always. The capacity we are discussing is linked to causality and can be detected as the difference between the probability that a certain outcome happens after a certain action is performed and the probability that the outcome happens if the action is not performed (Gopnik et al., 2004). To check the effectiveness of actions, the architecture discussed above should be enhanced with suitable mechanisms to observe the environment multiple times after having executed an action or not, and to compare the probability of achieving the outcome in the two cases (for some computational models of this, see: Butko & Movellan, 2010; Pitti et al., 2009; Sperati & Baldassarre, 2017).

Another very important issue not considered this far concerns the fact that the actions produced in the environment can produce different effects on the body and the environment and so the agent should be endowed with a mechanism to decide which effects (action-effect contingencies) are “interesting” and so worth triggering the learning processes illustrated above. One possibility is that the agent considers as interesting all “effects” corresponding to a change in the environment; the rationale of this is that all actions causing a change in the body/environment might be useful in the future (Barto et al., 2004; Santucci et al., 2016; Sperati & Baldassarre, 2017). Another possibility is to use intrinsic motivations such as novelty or surprise, i.e., to consider as interesting those effects of actions that respectively have never/rarely been experienced before, or that violate expectations (Barto et al., 2013). A last possibility is that the agent considers as interesting those action-effects that might be useful to achieve other effects if used to form action sequences (various techniques can be used to this purpose, e.g., see McGovern & Barto, 2001). Overall, this is an important open issue at the core of development and open-ended learning in robotics that deserves further exploration in the future.

7 Conclusion and perspectives

The sensitivity of an agent to the links between its actions and their consequences is central in the theories of psychology that roboticists use in their work, such as the sensorimotor contingency theory (e.g., O’Regan, 2011), the Gibsonian theory of affordances (Gibson, 1979) or the predictive coding theory (e.g., Clark, 2013). Sensitivity to sensorimotor contingencies is particularly important in developmental robotics because it provides a simple way to equip an agent with the ability to learn to interact with the world using self-organized exploration of its environment. In this paper, we have strengthened this statement by demonstrating how the use of this sensitivity by babies allows them to acquire and/or mature new motor and cognitive abilities such as body knowledge, memory, generalisation and goal-directedness. In addition, our literature review highlights the links between conclusions obtained in developmental psychology and current work in robotics, and thus offers readers from robotics a concrete and direct application to their field of

study.

The model proposed at the end of the article shows how exploitation of sensitivity to sensorimotor contingencies, combined with the notion of “goal” (i.e., a desired state of the world), allows an agent to organize its exploration of the world and develop new sensorimotor skills, in the present case the skills that underlie understanding of the structure of its body. This model is conceived to be suitable for all types of sensorimotor learning, and we hope that in the future it will be adapted both to better understand baby development and to build robots capable of more effective autonomous learning.

This article is also intended to highlight the value of close collaboration between developmental psychology and developmental robotics, as such a collaboration will (i) fill the lack of mechanistic approaches in development psychology, and (ii) provide new ideas and concrete data that roboticists can use to develop open-ended learning. We hope that our article contributes to the emergence of a common language between the two fields that will facilitate future fruitful collaboration.

Acknowledgments

The authors gratefully acknowledge the support of the EU funded FET-Open project “GOAL-Robots - Goal-based Open-ended Autonomous Learning Robots”, Grant agreement no 713010, and ERC Grant 323674 “FEEL”.

Chapitre 3

Développement des compétences corporelles durant la première année de vie du bébé

En révision à Enfance (soumis en Mai 2019)

Auteurs. Lisa Jacquey, Jacqueline Fagard, J. Kevin O'Regan et Rana Esseily

Résumé. Cette revue de la littérature propose d'examiner de quelle manière les compétences corporelles du bébé s'affinent au cours de la première année de vie, en détaillant ce développement à travers l'exploration du corps et l'exploration de l'environnement physique et social. Ce développement précoce apparaît alors être à l'origine de l'acquisition par le bébé d'un sens de l'agentivité (*sense of agency*) et d'un sens du corps propre (*body ownership*). Ainsi, le développement des compétences corporelles, par son statut de précurseur d'une connaissance plus approfondie du corps et de soi, jouerait un rôle essentiel dans le développement sociocognitif et psychomoteur de l'enfant.

Mots clefs. Compétences corporelles ; Connaissance du corps ; Développement précoce

1 Introduction

Imaginons un bébé de seulement quelques mois, allongé sur son tapis d'éveil et observons d'un peu plus près ses comportements : le bébé réunit ses mains au-dessus de sa poitrine, les entremêle et les observe, il bascule ensuite sur le côté et attrape un jouet qu'il ramène à la bouche puis secoue vigoureusement à plusieurs reprises, son papa entre dans la pièce, le bébé le regarde et babille. En adoptant ce regard attentif, nous découvrons la grande richesse des actions réalisées par un jeune bébé lorsqu'il est plongé dans l'exploration de son propre corps et de son environnement physique et social. Ces comportements, dont sont témoins quotidiennement celles et ceux qui prennent soin des tout-petits, révèlent la capacité du bébé à utiliser son corps de manière appropriée pour interagir avec le monde qui l'entoure. Cette capacité est ce que nous définissons comme le « savoir-faire corporel » du bébé.

Il est curieux de constater que le développement du savoir-faire corporel n'est pas un domaine d'étude en tant que tel en psychologie du développement, comme le sont par exemple le développement du langage, de la marche ou de la « théorie de l'esprit ». Ainsi, les travaux portant sur l'acquisition de compétences corporelles précoces, malgré leur nombre, n'ont pas été référencés sous une étiquette commune et n'ont pas fait l'objet de revues coordonnées de la littérature — à l'exception d'une revue de la littérature réalisée par [Rochat & Goubet \(2000\)](#) dans laquelle les auteurs avancent que les compétences corporelles précoces du bébé pourraient être les précurseurs du développement ultérieur de la connaissance de soi.

Nous souhaitons par le présent article œuvrer à combler le manque de cohésion dans l'étude du développement du savoir-faire corporel et compléter la revue de la littérature réalisée par [Rochat & Goubet \(2000\)](#) en y apportant un éclairage nouveau à travers l'examen d'études récentes. Ainsi, nous espérons offrir une vue d'ensemble des études relevant du savoir-faire corporel chez le bébé afin de (1) rappeler que le bébé présente des compétences corporelles dès sa première année de vie et même *in utero* et (2) montrer que ces compétences corporelles se développent grâce à l'exploration par le bébé de son corps et du monde physique et social qui l'entoure. Il est important de noter que cet article ne peut pas rapporter de façon exhaustive tous les travaux relatifs à l'acquisition de compétences corporelles précoces : il existe en effet des exemples non cités ici qui pourraient témoigner de manière indirecte du savoir-faire corporel du bébé, telles que les études sur l'espace péripersonnel (voir par ex. [Begum Ali et al., 2015](#); [Bremner et al., 2008](#)), celles sur la correspondance visuo-motrice (voir par ex. [Filippetti et al., 2013, 2015b](#); [Rochat, 1998](#)) ou celles sur la compréhension du lien entre le moyen et le but (voir par ex. [Elsner & Aschersleben, 2003](#); [Munakata et al., 1997](#)).

Nous avons choisi dans cet article de présenter uniquement les études illustrant directement ce que nous considérons comme les trois principaux modes de développement du savoir-faire corporel : l'exploration du corps, l'interaction avec l'environnement physique et l'interaction avec

l'environnement social. Nous proposons dans ce qui suit d'examiner, au sein de chacun de ces modes de développement, la manière dont les compétences corporelles du bébé s'affinent au cours de la première année de vie. Avant cela, nous débiterons par une section décrivant deux mécanismes d'apprentissage mis en jeu durant l'exploration et sous-tendant ainsi le développement du savoir-faire corporel durant la petite enfance : l'exploitation de la sensibilité aux contingences sensorimotrices et la motivation intrinsèque.

2 Exploration : quels mécanismes mis en jeu ?

Avant d'examiner le développement du savoir-faire corporel à travers l'exploration du corps, de l'environnement physique et de l'environnement social, il apparaît primordial de chercher à comprendre quels sont les mécanismes sous-tendant un tel développement. Nous faisons ici l'hypothèse que deux mécanismes sont mis en jeu : l'exploitation de la sensibilité aux contingences sensorimotrices et la motivation intrinsèque.

La sensibilité aux contingences sensorimotrices correspond à la capacité du bébé à détecter le lien entre ses actions et les conséquences de celles-ci, comme par exemple, le lien entre un mouvement de la main devant les yeux et le retour visuel en résultant. Cette sensibilité aux contingences sensorimotrices semble présente chez le bébé dès la naissance et même *in utero*. Ainsi, c'est l'exploitation de cette sensibilité qui permettrait au bébé d'appréhender (de manière implicite au départ puis ensuite consciemment) les moyens par lesquels il peut interagir avec son corps sur son propre corps et sur son environnement physique et social. Cependant, ce mécanisme seul ne pourrait pas offrir un apprentissage efficace au bébé : l'ensemble des contingences sensorimotrices pouvant être explorées étant trop vaste, l'exploration de celles-ci par le bébé doit être organisée.

Un second mécanisme d'apprentissage, la motivation intrinsèque, pourrait alors être en jeu. La motivation intrinsèque est ce qui « pousse » le bébé à rechercher des situations d'apprentissage ; l'objet de la motivation intrinsèque n'est donc pas la satisfaction des besoins physiologiques (nourriture, contact social, etc.) — c'est l'objet de la « motivation extrinsèque » — mais l'attrait pour certaines situations en elles-mêmes. Plus précisément, la motivation intrinsèque « pousse » le bébé à explorer des situations lui offrant un progrès dans ses connaissances sur le monde (motivation basée sur les connaissances) ou dans ses moyens d'agir sur le monde (motivation basée sur les compétences). Cela s'illustre par exemple dans la préférence du bébé pour l'exploration des situations nouvelles (voir [Colombo & Mitchell, 2009](#), pour une revue), impossibles (par ex. [Stahl & Feigenson, 2015](#)) ou peu probables (par ex. [Sim & Xu, 2017](#)). Ainsi, l'exploration par le bébé de certaines contingences sensorimotrices plutôt que d'autres ne serait pas arbitraire mais motivée par une recherche de situations permettant un progrès en apprentissage. Le bébé présente d'ailleurs des signes de contentement (il sourit et/ou babille) lorsque sa recherche d'apprentissage est satisfaite

— par exemple, lorsque ses mouvements déclenchent l'apparition d'une stimulation audiovisuelle (Lewis et al., 1985) et des signes de frustration (il crie et/ou pleure) dans les situations où ses attentes sont mises à mal (par ex. Fagen & Ohr, 1985; Watson, 1972).

Ainsi, en mettant en jeu ces deux mécanismes d'apprentissage, l'exploration du monde occupe une place centrale dans le développement sensorimoteur du bébé. Nous allons maintenant examiner en détails comment cette exploration du corps, de l'environnement physique et de l'environnement social guide plus particulièrement le développement du savoir-faire corporel chez le bébé.

3 Exploration du corps

Une première manière dont le savoir-faire corporel du bébé semble se développer est à travers l'exploration tactile par le bébé de son propre corps, c'est-à-dire lorsque le bébé touche son corps avec ses mains et ses pieds. Nous pouvons alors distinguer deux types d'études s'intéressant aux mouvements du bébé dirigés vers son corps, celles portant sur l'exploration tactile spontanée du corps (*self touch*) et celles traitant des réactions du bébé à des stimulations tactiles externes appliquées sur son corps.

3.1 Exploration tactile spontanée du corps

L'observation fine des mouvements *in utero* se fait par l'utilisation de l'échographie 4D, une méthode d'imagerie qui offre des images très précises des actions du fœtus (voir Kurjak et al., 2008, pour une revue de la littérature) (voir Figure 3.1a). Cette méthode d'imagerie a permis de montrer que l'exploration tactile spontanée du corps est présente dès la vie fœtale et que cette exploration, sans doute au hasard au départ, devient très vite organisée (Kurjak et al., 2004; Piontelli, 2010). Par exemple, le fœtus semble explorer préférentiellement les zones très innervées de son corps (par ex. la bouche et les yeux) ainsi que les zones frontières entre parties innervées et non innervées (par ex. entre le visage et le crâne au niveau du nerf trijumeau) au détriment des zones faiblement innervées qu'il n'explore que très rarement (par ex. le crâne) (Piontelli, 2010). Cette organisation de l'exploration tactile du corps est probablement sous-tendue par la sensibilité du fœtus aux contingences sensorimotrices (voir ci-dessus). Celle-ci semble en effet déjà présente *in utero* mais sous une forme rudimentaire n'impliquant pas que le fœtus possède une connaissance explicite des conséquences de ses actions. Cette sensibilité précoce aux contingences sensorimotrices pourrait alors mettre en jeu un simple apprentissage par renforcement : lorsqu'une action provoque une stimulation plaisante et/ou intéressante pour le fœtus, cette action est « renforcée » et répétée. Par exemple, il a été observé chez des fœtus dès le deuxième trimestre de grossesse des mouvements de coordination main-bouche, c'est-à-dire une ouverture de la bouche précédant l'arrivée de la main à la bouche (voir Figure 3.1a) (Myowa-Yamakoshi & Takeshita, 2006; Reissland et al.,

2014). De plus, il a été constaté que les mouvements des mains du fœtus pouvaient présenter des caractéristiques spatiales et temporelles différentes en fonction de leurs conséquences, avec des mouvements dirigés vers les yeux présentant une décélération au moment de l'approche de la main plus forte que la décélération observée pour des mouvements des mains dirigés vers la bouche (Zoia et al., 2007). Le fœtus semble ainsi être sensible au lien entre les mouvements de ses mains et les sensations tactiles subséquentes, du moins pour certains mouvements des mains dirigés vers la bouche et les yeux, ce qui explique sûrement que l'exploration tactile spontanée observée chez le fœtus puisse être organisée.

A la naissance, malgré un fort changement d'environnement, le bébé présente des compétences corporelles en continuité avec celles qu'il a développées *in utero*. Les comportements d'exploration tactile spontanée du corps se retrouvent ainsi chez le nouveau-né (DiMercurio et al., 2018; Thomas et al., 2015). Celui-ci est alors capable de différencier les sensations tactiles causées par l'exploration de son propre corps et celles causées par des stimulations externes appliquées sur son corps. Par exemple, Rochat & Hespos (1997) ont observé que des nouveau-nés ne répondaient pas au « réflexe des points cardinaux » (mouvement réflexe de la tête en réaction à une caresse sur la joue) lorsque la stimulation tactile appliquée sur leur joue était causée par le contact de leur propre main, alors qu'ils y répondaient lorsque la stimulation tactile était appliquée par un expérimentateur.

Au cours des six premiers mois de vie, l'exploration tactile spontanée du corps évolue : elle passe de mouvements dirigés vers le haut du corps (visage et tronc) et réalisés avec l'extérieur de la main à des mouvements dirigés vers le bas du corps (jambes et pieds) et réalisés avec la paume de la main puis avec un agrippement (DiMercurio et al., 2018; Thomas et al., 2015).

3.2 Réaction à une stimulation tactile externe appliquée sur le corps

Cette évolution des mouvements dirigés vers le corps s'observe aussi à travers les réactions du bébé suite à une stimulation tactile externe appliquée sur son corps. Ces comportements ont été étudiés en laboratoire chez des bébés âgés de 2 à 8 mois en plaçant des pastilles vibrotactiles à différents endroits du corps des bébés et en mesurant la capacité des bébés à bouger le membre stimulé ou à toucher/attraper les pastilles (Chinn et al., 2019; Hoffmann et al., 2017; Somogyi et al., 2018). Les résultats des études utilisant cette méthodologie suggèrent que lorsqu'une pastille est appliquée sur l'un de leurs membres, des bébés âgés de 3 mois bougent tout leur corps alors que des bébés âgés de 5 - 6 mois bougent principalement le membre stimulé (Somogyi et al., 2018). De plus, il apparaît que les bébés sont au départ (vers l'âge de 2 mois) uniquement capables de localiser les pastilles placées sur le visage et non celles positionnées sur le reste du corps (Chinn et al., 2019; Hoffmann et al., 2017) puis, qu'au cours des mois, les bébés deviennent progressivement capables de localiser les pastilles placées à d'autres positions : sur l'abdomen à l'âge de 5 mois, sur les bras à l'âge de 6 mois et sur les épaules à l'âge de 8 mois (Hoffmann et al., 2017). Les bébés semblent

aussi améliorer entre l'âge de 2 et 8 mois leur capacité à attraper les pastilles en passant d'une simple atteinte avec le côté extérieur de la main à une atteinte avec la paume ouverte puis à une réelle saisie de la pastille (Chinn et al., 2019; Somogyi et al., 2018).

3.3 Conclusion

Les études présentées ci-dessus suggèrent que dès la vie fœtale et durant la première année de vie, le bébé réalise une exploration tactile spontanée de son propre corps, que celle-ci est organisée, évolue au cours du développement en suivant la loi céphalo-caudale (du haut vers le bas du corps) et s'accompagne d'une maturation de la position et de l'ouverture de la main. De plus, les conclusions de ces études suggèrent que le bébé affine au fur et à mesure des premiers mois ses réponses motrices en réaction à des stimulations tactiles externes appliquées sur son corps. Ainsi, il apparaît que l'exploration tactile du corps pourrait avoir une influence significative dans le développement du savoir-faire corporel du bébé. En effet, cette exploration organisée permet au bébé de ressentir des sensations de toucher double, c'est-à-dire des sensations tactiles simultanément au niveau des mains ou des pieds et de la zone explorée, ce qui joue certainement un rôle dans la mise en place de cartes sensorimotrices précoces (Fagard et al., 2018). On peut alors supposer que l'exploration tactile spontanée du corps permet au bébé, d'une part, de découvrir la structure de son corps et, d'autre part, de progressivement acquérir un sens de la propriété du corps (body ownership), c'est-à-dire de ressentir son corps comme étant « sien ». De plus, les mouvements dirigés vers le corps de manière spontanée ou en réponse à des stimulations externes semblent permettre au bébé d'exercer de nouvelles compétences corporelles telles que l'atteinte et la prise (voir ci-après pour une présentation détaillée du développement de ces deux habiletés manuelles).

4 Interaction avec l'environnement physique

Une seconde manière par laquelle le savoir-faire corporel semble se développer durant la petite enfance est l'interaction entre le bébé et son environnement physique. Nous détaillons ici trois types d'études : celles montrant une capacité précoce chez le bébé à répondre aux stimulations environnementales, celles s'intéressant à l'engagement du bébé dans des interactions avec son environnement physique et celles portant sur le développement des habiletés manuelles durant la première année de vie.

4.1 Capacité précoce à répondre aux stimulations environnementales

Dès le premier trimestre de grossesse, le fœtus interagit avec son environnement : il bouge (Kurjak et al., 2008) et reçoit en retour des informations sensorielles sur le monde intra- et extra-utérin qui l'entoure (voir Lecanuet & Schaal, 1996, pour une revue de la littérature). Le fœtus ne

réalise pas uniquement des mouvements généraux causés par une excitation globale de son système moteur mais aussi des mouvements isolés des bras et des jambes (voir par ex. Kurjak et al., 2008). Le fœtus semble alors capable de réaliser des mouvements en réponse à une stimulation. Par exemple, le fœtus augmente ses mouvements en réaction à la voix de sa mère (Ferrari et al., 2016; Marx & Nagy, 2015; Reissland et al., 2016) ou en réaction aux mouvements de celle-ci (Marx & Nagy, 2015). A la naissance, contrairement à ce qui avait été avancé par les pionniers de la psychologie du développement (voir par ex. Piaget, 1936), les mouvements réalisés par le bébé ne sont pas uniquement des réflexes. Certains des mouvements du nouveau-né sont en effet réalisés d'une manière apparaissant comme contrôlée et structurée. Ces mouvements composent un petit répertoire d'actions bien maîtrisées par le nouveau-né comme par exemple les mouvements des bras le long de l'axe vertical (Delafield-Butt et al., 2018; van der Meer, 1997; van der Meer et al., 1995, 1996), les mouvements de succion non-nutritive (par ex. DeCasper & Fifer, 1980; Rochat & Striano, 1999) ou le contrôle oculaire (par ex. Farroni et al., 2004). C'est en observant les actions appartenant à ce répertoire moteur limité que nous découvrons que le nouveau-né est capable de modifier ses mouvements en réponse aux informations perceptives qu'il reçoit. Par exemple, un nouveau-né placé dans de bonnes conditions et exposé à des flux optiques modifie ses mouvements de marche (*stepping*) en réaction aux caractéristiques du flux optique auquel il est en train d'être exposé (Barbu-Roth et al., 2009).

Il est intéressant de relever ici que certaines actions (par ex. la succion, les mouvements oculaires) sont souvent oubliées lorsque l'on s'intéresse aux capacités motrices précoces du bébé, alors même que ces actions, bien maîtrisées dès le début de la vie, témoignent des compétences corporelles du nouveau-né. De plus, il est important de rappeler que les compétences corporelles du nouveau-né ne peuvent s'exprimer pleinement que lorsque celui-ci se trouve dans les conditions permettant leur expression (par ex. dans l'eau pour atténuer les effets de la gravité, avec la tête soutenue pour libérer la motricité, etc.) ce qui n'est pas toujours le cas dans les études scientifiques ou dans les conditions de la vie quotidienne.

4.2 Capacités à agir sur l'environnement physique

Les capacités du bébé à agir sur son environnement physique sont sous-tendues par sa sensibilité aux contingences sensorimotrices impliquant une réponse du monde physique. Cette sensibilité peut être mesurée en laboratoire grâce à des méthodes dites de conditionnement opérant dans lesquelles la réalisation par le bébé d'une certaine action déclenche l'apparition d'une stimulation plaisante. Les chercheurs mesurent alors la propension du bébé à réaliser l'action « contingente » avant, pendant et après ce conditionnement. Des études de ce type ont été réalisées chez le nouveau-né montrant que celui-ci est sensible à des contingences sensorimotrices impliquant certaines actions stéréotypiques précises faisant partie de son répertoire moteur comme par exemple des mouvements

des bras le long de l'axe vertical (van der Meer, 1997; van der Meer et al., 1995, 1996, où le retour visuel « contingent » est la vision de la main) ou des mouvements de succion non-nutritive (par ex. Rochat & Striano, 1999; DeCasper & Fifer, 1980) (voir Figure 3.1b).

Au cours du développement, les capacités du bébé à agir sur le monde physique qui l'entoure s'enrichissent. Cela a pu être mis en évidence par l'utilisation du « paradigme du mobile » qui fut développé et exploité par Rovee-Collier et ses collaborateurs (Rovee & Rovee, 1969) (voir Figure 3.1c). Dans cette méthode, le bébé est placé sur le dos et l'un de ses membres (bras ou jambe) est attaché grâce à une ficelle à un mobile placé au-dessus de lui, faisant ainsi que les mouvements de ce membre déclenchent des mouvements du mobile. Cette méthode a permis de montrer qu'à partir de l'âge de 2 - 3 mois la sensibilité du bébé aux contingences sensorimotrices s'étend à l'ensemble du répertoire moteur. Le bébé explore alors son répertoire moteur et réalise l'action précise permettant de faire bouger le mobile et cela même lorsque le mouvement impliqué n'est pas un mouvement qu'il réalise au quotidien comme par exemple des flexions et extensions des genoux (par ex. Angulo-Kinzler, 2001; Angulo-Kinzler et al., 2002; Chen et al., 2002; Sargent et al., 2015, 2014; Thelen, 1994). Cet affinement des compétences corporelles du bébé s'illustre par ailleurs dans la capacité du bébé à utiliser ses membres de manière différenciée pour agir sur le monde. Pour étudier cette capacité, des chercheurs ont placé des bébés de différents âges dans une situation où les mouvements d'un seul de leurs bras ou d'une seule de leurs jambes étaient à l'origine des mouvements du mobile (par ex. Rovee-Collier et al., 1978; Watanabe & Taga, 2006) ou d'un personnage sur un écran (Chapitre 4). Les chercheurs ont observé que dans cette situation où seuls les mouvements d'un des membres du bébé étaient à l'origine d'une stimulation plaisante, les jeunes bébés (âgés de 2 - 3 mois) bougeaient tout leur corps ou leurs deux bras de manière indifférenciée (Watanabe & Taga, 2006) alors que les bébés plus âgés (âgés de 4 à 8 mois) bougeaient le bras connecté au dispositif plus que l'autre bras (Watanabe & Taga, 2006 ou Chapitre 4). Les résultats de ces études suggèrent ainsi qu'au cours des premiers mois de vie le bébé devient progressivement capable d'utiliser ses membres de manière différenciée lorsqu'il réalise des mouvements ayant des conséquences plaisantes et/ou intéressantes. Néanmoins, il est important de noter que le bébé continue durant toute la première année de vie à présenter des mouvements parasites des membres non-impliqués dans l'action réalisée appelés syncinésies (*overflow movements*), ce qui ne veut pas dire qu'il n'est pas capable de mouvements différenciés dans certaines situations comme nous l'avons montré ci-dessus. Par exemple, lorsque le bébé attrape un objet ou secoue un hochet avec une seule main, son autre main réalise des mouvements moins marqués mais possédant les mêmes caractéristiques (D'Souza et al., 2016; Soska et al., 2012) et cela particulièrement lorsque le bébé réalise des mouvements rapides (D'Souza et al., 2016).

Les études présentées ci-dessus suggèrent que le bébé est très tôt capable d'agir sur son environnement physique. Mais est-il pour autant capable d'anticiper les conséquences de ses actions

sur son environnement physique ? De premières réponses à cette question ont été apportées par l'utilisation d'appareils de détection des mouvements oculaires (*eye-tracker*). Cette méthodologie permet de déterminer avec plus ou moins de précision la position du regard du bébé sur un écran et donc de mesurer si le bébé est capable ou non d'anticiper l'apparition d'une stimulation contingente à l'écran. Il a ainsi été observé que des bébés âgés de 6 et 8 mois étaient capables de déclencher l'apparition d'une image sur un écran en fixant un point sur l'écran et d'anticiper l'apparition de cette image en bougeant leurs yeux vers l'endroit de son apparition avant son apparition (Wang et al., 2012). Cette capacité d'anticipation a aussi été observée chez des bébés âgés de 10 mois dans une tâche où les bébés pouvaient faire apparaître une vidéo en appuyant avec la main sur un bouton (Kenward, 2010) (voir Figure 3.1d).

4.3 Le développement des habiletés manuelles

L'évolution des habiletés manuelles au cours de la première année de vie est facilement observable et semble être une illustration claire du développement du savoir-corporel du bébé. Intéressons-nous par exemple à la capacité du bébé à tendre les mains vers un objet placé devant lui appelée « geste d'atteinte » (*reaching*). Durant la grossesse, le fœtus présente déjà les prémices d'une telle capacité : par exemple celui-ci réalise des mouvements de main dirigés vers la bouche, vers les yeux (Kurjak et al., 2004; Zoia et al., 2007) ou vers le cordon ombilical (Piontelli, 2010). Les prémices du geste d'atteinte se retrouvent aussi à la naissance, le bébé étant capable de tendre les mains en direction d'un objet mais cela uniquement dans des conditions bien spécifiques dites de « motricité libérée¹ » (Grenier, 1981; Von Hofsten, 1982). Le développement du geste d'atteinte durant les premiers mois de vie a été richement documenté depuis les travaux fondateurs de White et al. (1964). Les conclusions des travaux menés sur le sujet ces cinquante dernières années suggèrent que le bébé réalise de premiers « vrais » gestes d'atteinte aux alentours de l'âge de 3 - 5 mois (voir par ex. Fagard, 2001, pour une revue de la littérature). Différentes hypothèses, que nous ne développerons pas toutes ici, ont alors été avancées afin d'expliquer le développement du geste d'atteinte durant les premiers mois de vie (voir le chapitre XI de Fagard, 2001). L'une de ces hypothèses (voir par ex. Corbetta et al., 2018) défend que le développement du geste d'atteinte est sous-tendu par trois mécanismes : (1) la capacité de perception intermodale du bébé, qui lui donnerait un retour perceptif unifié de son mouvement de bras, (2) la sensibilité du bébé aux contingences sensorimotrices, qui lui permettrait de détecter le lien entre son mouvement du bras et la sensation haptique résultant du contact entre sa main et l'objet et (3) la motivation du bébé

¹La « motricité libérée » est une méthode développée par Grenier (1981) permettant d'observer les compétences motrices du nouveau-né en « libérant » celui-ci de la motricité réflexe du tronc cérébral et en établissant une communication avec lui. Pour cela, le nouveau-né doit être assis avec les jambes repliées devant son ventre et le tronc droit à 90° sans dossier. Le praticien doit alors lui fixer la nuque d'une main et placer l'autre main sur ses jambes, puis capter le regard du nouveau-né et lui parler sans cesse à voix basse, en réalisant des pressions sur les jambes du nouveau-né.

à interagir avec le monde qui l'entoure, qui le « pousserait » à répéter les mouvements lui ayant préalablement permis de toucher l'objet. Suivant cette hypothèse, la première occurrence d'atteinte de l'objet, qui pourrait avoir lieu par hasard, serait causée par l'augmentation vers l'âge de 3 mois de l'activité motrice spontanée du bébé en présence d'un objet (Bhat & Galloway, 2006). La sensation multisensorielle (proprioceptive, haptique et visuelle) résultant de cette première atteinte offrirait ainsi au bébé une conséquence observable de son action. Le geste d'atteinte réalisé par le bébé serait alors renforcé positivement. Cela pourrait expliquer le fait que le bébé réalise de manière répétée de premières tentatives de geste d'atteinte accompagné d'un regard vers l'objet, malgré le fait que ces premières tentatives n'aboutissent pas toujours à toucher l'objet. Parallèlement à l'acquisition du geste d'atteinte, le bébé acquiert une seconde habileté manuelle au cours de la première année de vie, la capacité à saisir (*grasping*), dont nous ne présenterons pas l'acquisition ici.

Les habiletés manuelles du bébé s'affinent au fur et à mesure de la première année de vie. Au départ, les gestes d'atteinte et de prise réalisés par le bébé sont stéréotypés et similaires pour tout objet (prise « palmaire » avec les deux mains). Puis, progressivement, le bébé prend en compte les affordances des objets présents autour de lui : il adapte ses mouvements d'atteinte et de prise aux caractéristiques de chaque objet. Le bébé réalise par exemple des mouvements d'atteinte uniquement vers les objets à sa portée (Rochat et al., 1999), adapte sa saisie à la taille, la forme et la texture de l'objet (Corbetta et al., 2000; Bourgeois et al., 2005; Fagard & Jacquet, 1996), anticipe l'orientation de la main vis-à-vis de la position de l'objet (Lockman et al., 1984; von Hofsten & Fazel-Zandy, 1984) ou encore utilise les deux mains de manière complémentaire pour réaliser des actions complexes (Fagard, 1998). La pratique répétée et donc l'interaction du bébé avec son environnement physique jouerait ainsi un rôle — conjointement à celui joué par l'apprentissage social détaillé ci-après — dans l'enrichissement au cours de la première année de vie des habiletés manuelles du bébé.

4.4 Conclusion

Les conclusions des études présentées ci-dessus suggèrent que le bébé est capable de modifier son comportement en réponse aux stimulations environnementales, d'agir sur son environnement physique et d'acquérir et affiner de nouvelles habiletés manuelles durant la première année de vie. Il apparaît ainsi que l'interaction avec l'environnement physique pourrait jouer un rôle important dans le développement du savoir-faire corporel chez le bébé. En effet, en réalisant des actions en réaction aux stimulations de son environnement, le bébé semble explorer et enrichir son répertoire moteur. Parallèlement, les capacités du bébé à agir sur son environnement physique, sous-tendues par la sensibilité aux contingences sensorimotrices, semblent entraîner le bébé à mettre en pratique au départ un petit nombre d'actions stéréotypées, puis l'ensemble de son répertoire moteur. Le bébé

pourrait par ce biais développer un sens de l'agentivité (*sense of agency*), c'est-à-dire la sensation de pouvoir agir sur le monde. Les capacités du bébé à agir sur le monde physique semblent aussi permettre à celui-ci de progressivement différencier ses membres et d'apprendre la structure de son corps. Les conséquences de l'interaction entre le bébé et son environnement physique s'observent très clairement dans le développement des habiletés manuelles durant la première année de vie : en agissant sur les objets qui l'entourent, le bébé semble affiner ses compétences corporelles et en acquérir de nouvelles.

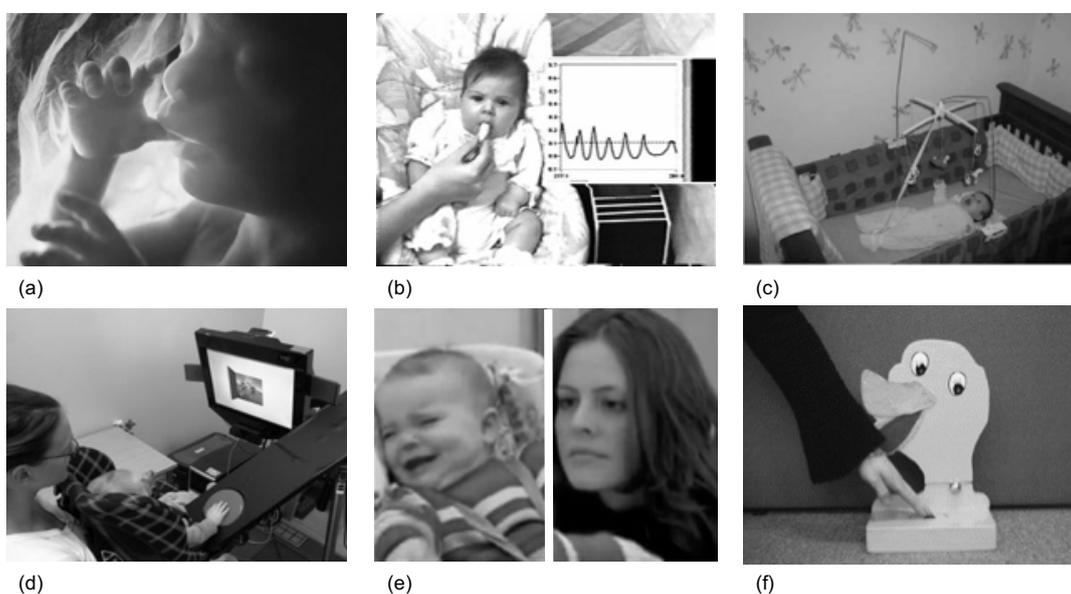


Figure 3.1 – Exemples de paradigmes permettant l'étude du « savoir-faire corporel » chez le bébé. (a) Échographie 4D : méthode d'imagerie qui permet d'observer les mouvements du fœtus *in utero*, comme par exemple des mouvements de coordination main-bouche (Myowa-Yamakoshi & Takeshita, 2006). (b) Succion non-nutritive : le bébé varie son rythme de succion lorsque cela provoque la variation de la hauteur d'un stimulus auditif (Rochat & Striano, 1999). (c) Paradigme du mobile : le bébé est placé sur le dos et l'un de ses membres est attaché grâce à une ficelle à un mobile placé au-dessus de lui, de sorte que les mouvements du bébé déclenchent des mouvements du mobile (Rovee & Rovee, 1969). (d) Apparition d'une image à l'écran déclenchée par l'appui sur un bouton avec la main : le bébé de 10 mois anticipe l'apparition de l'image (Kenward, 2010). (e) Expérience du « *still-face* » : le bébé remarque et réagit négativement lorsque sa mère arrête brutalement l'interaction sociale (Tronick et al., 1978). (f) Apprentissage par imitation : suite à la démonstration d'une action au bébé — ici appuyer sur un bouton pour obtenir un effet — l'expérimentateur mesure la capacité du bébé à reproduire cette action (Herbert et al., 2006).

5 Interaction avec l'environnement social

Le développement du savoir-faire corporel du bébé semble aussi se réaliser grâce à l'interaction du bébé avec ses partenaires sociaux. Les études s'intéressant à l'engagement du bébé dans des interactions sociales et celles portant sur les capacités d'imitation du bébé illustrent clairement la manière dont l'environnement social guide le développement du savoir-faire corporel durant la première année de vie.

5.1 Engagement précoce dans des interactions sociales

La capacité du bébé à s'engager dans des interactions sociales repose sur sa sensibilité aux régularités de l'interaction avec ses partenaires sociaux, autrement dit sa sensibilité aux « contingences sociales ». Une contingence sociale correspond au lien entre une action et la réponse donnée à cette action par un partenaire social. Les contingences sociales font donc partie des contingences sensorimotrices (voir ci-dessus) mais possèdent des caractéristiques spécifiques. Premièrement, celles-ci présentent un délai relativement long (entre une et trois secondes en moyenne) et souvent variable entre l'action et la réponse donnée par le partenaire social (Keller et al., 1999) — par ex. le bref laps de temps entre le babillage du bébé et la réponse de sa mère. Deuxièmement, celles-ci sont dites « imparfaites » (Watson, 1979) : une action n'entraîne pas systématiquement une réponse du partenaire social et le comportement du partenaire peut avoir lieu sans qu'aucune action ne l'ait provoqué². Troisièmement, les contingences sociales étant multimodales, celles-ci sont souvent plus « complexes » que les contingences non-sociales (Gros-Louis et al., 2006). En effet le partenaire social peut répondre à différents aspects de l'action du bébé et avec différentes modalités — par ex. lorsqu'un bébé vocalise, sa mère peut répondre à la fréquence, la hauteur ou l'intensité des vocalisations et donner sa réponse en parlant, souriant ou touchant le bébé. Dès les premiers mois de vie, le bébé semble sensible à ces contingences sociales (voir par ex. Northrup, 2016; Tarabulsky et al., 1996, pour des revues de la littérature). L'exemple le plus marquant est donné par la célèbre expérience du « *still-face* » (Tronick et al., 1978) dans laquelle il est demandé à une mère faisant face à son bébé de soudainement arrêter d'interagir avec lui en adoptant une expression du visage statique (voir Figure 3.1e). Instantanément, le bébé semble remarquer l'arrêt de la contingence sociale avec sa mère et réagit très négativement en pleurant et/ou en se détournant de sa mère. Cette réaction du bébé à l'arrêt d'une interaction sociale a été observée dès l'âge de 2 mois (par ex. Adamson & Frick, 2003, pour une revue de la littérature). Le jeune bébé semble aussi être sensible aux modifications plus subtiles d'une contingence sociale : par exemple, dans

²Selon une théorie avancée par Watson (voir par ex. Gergely & Watson, 1999), l'intérêt du bébé pour les contingences « imparfaites » se développerait entre l'âge de 3 et 5 mois. Cependant, mis à part une étude réalisée par Bahrck & Watson (1985) dans laquelle les auteurs ont observé que des bébés âgés de 3 mois passaient autant de temps à regarder une vidéo de leurs mouvements de jambe en direct qu'une version rejouée et que des bébés âgés de 5 mois passaient significativement plus de temps à regarder la version rejouée que la version en direct, aucune donnée ne permet de valider ou invalider cette théorie.

une situation expérimentale où le bébé et sa mère interagissent par vidéo ou en face à face, le bébé, à partir de l'âge de 2 - 3 mois, semble détecter et réagir négativement lorsque les comportements de sa mère ne lui sont plus présentés en temps réel mais avec un fort décalage dans le temps, c'est-à-dire lorsque l'interaction avec la mère est perçue par le bébé comme non-contingente (Murray & Trevarthen, 1985; Nadel et al., 1999; Striano et al., 2005). Ce second résultat semble plus fragile que celui observé dans l'expérience du « *still-face* », certains auteurs n'ayant en effet pas observé de changement de comportement chez les bébés entre les périodes d'interaction contingente et non-contingente avec leur mère (Hains & Muir, 1996; Rochat et al., 1998).

La sensibilité du bébé aux contingences sociales lui permet très tôt d'engager des interactions sociales avec les personnes qui l'entourent. Ainsi, dès l'âge de 2 - 3 mois, le bébé se comporte différemment en présence d'une personne et d'un objet et cela même pour un objet répondant de manière contingente aux actions du bébé (Legerstee et al., 1987). Le bébé engage alors ce que les auteurs appellent des « proto-conversations » avec ses partenaires sociaux (Trevarthen, 1979). Cet engagement actif du bébé dans l'interaction est multimodal et se reflète chez le bébé à travers des sourires, des vocalisations, des regards et des gestes (voir par ex. Gratier et al., 2015; Lavelli & Fogel, 2013). Ainsi, il apparaît que l'interaction avec les partenaires sociaux pourrait permettre au bébé d'acquérir et d'affiner de nouvelles compétences corporelles comme les expressions faciales (par ex. pour le sourire Bigelow & Walden, 2009; Field et al., 1985) ou l'apprentissage vocal (par ex. Bloom et al., 1987; Goldstein et al., 2003; Goldstein & Schwade, 2008).

5.2 Imitation et observation des actions d'autrui

Le développement du savoir-faire corporel est soutenu par la capacité du bébé à reproduire l'action d'autrui (ou modifier sa propre action) par imitation ou observation des actions d'autrui : d'une part, l'imitation d'une action de manière précise est la preuve d'une utilisation appropriée du corps et, d'autre part, la reproduction de l'action d'autrui (ou la modification de sa propre action) est un moyen d'acquérir de nouvelles compétences corporelles. La possibilité que le bébé démontre dès la naissance des capacités d'imitation a été rendue célèbre par les travaux de Meltzoff et ses collaborateurs sur la protrusion de la langue, suggérant que les nouveau-nés sont capables d'imiter un adulte tirant la langue (Field et al., 1982; Meltzoff & Moore, 1977). La capacité du bébé à imiter des expressions faciales a ensuite été généralisée à d'autres actions comme le pincement des lèvres ou l'ouverture de la bouche (voir par ex. Meltzoff & Moore, 1997). Cependant, l'existence d'une telle « imitation néonatale » est fortement controversée en psychologie du développement. Elle a dans un premier temps été remise en question par plusieurs méta-analyses dont les conclusions suggèrent que la présence d'une correspondance entre le comportement de l'adulte et celui du nouveau-né ne concerne qu'une seule action, la protrusion de la langue (voir par ex. Anisfeld, 1996, 2005). Par la suite, de nouvelles revues de la littérature (voir par ex. Jones, 2009; Oostenbroek

et al., 2013), ainsi qu’une récente étude longitudinale menée sur une centaine de bébés dans des conditions naturelles (Oostenbroek et al., 2016) ont complètement remis en cause l’existence d’une imitation néonatale. Ces travaux suggèrent que les comportements d’imitation observés chez le nouveau-né ne sont en réalité que des artefacts. Ainsi, il apparaît désormais que la protrusion de la langue serait un comportement stéréotypé du nouveau-né, adopté par ce dernier lorsqu’il fait face à n’importe quelle stimulation intéressante, comme par exemple un adulte tirant la langue (voir par ex. Heyes, 2016).

Les premières preuves non controversées de reproduction des actions d’autrui semblent s’observer chez le bébé vers l’âge de 3 mois pour l’imitation vocale (Gratier & Devouche, 2011), vers l’âge de 6 mois pour l’imitation d’actions simples réalisées sur des objets (voir pour un ex. Collie & Hayne, 1999 et Elsner, 2007, pour une revue de la littérature) et vers la fin de la première année de vie pour l’apprentissage par observation (Esseily et al., 2010). Le bébé, par reproduction des actions d’autrui ou par modification de ses propres actions, semble alors capable d’acquérir de nouveaux comportements moteurs, tels que placer un objet dans une boîte (par ex. Legerstee & Markova, 2008), sortir un objet d’une boîte en tenant le couvercle de cette boîte (par ex. Esseily et al., 2010), tirer sur une corde pour obtenir un effet (par ex. Collie & Hayne, 1999), manipuler un objet de manière bi-manuelle pour produire un son (par ex. Fagard & Lockman, 2009) ou encore appuyer sur un bouton pour obtenir un effet (par ex. Herbert et al., 2006; Provasi et al., 2001) (voir Figure 3.1f). La capacité du bébé à reproduire les actions d’autrui s’enrichit durant la première et seconde année de vie (voir Elsner, 2007, pour une revue de la littérature). Ainsi, dans la deuxième année de vie, le bébé devient capable de reproduire des actions complexes ne faisant pas partie de son répertoire moteur, telles que l’utilisation d’outils (voir par ex. Esseily et al., 2010; Somogyi et al., 2015).

5.3 Conclusion

L’insertion du bébé dans un environnement social, qui lui fournit de multiples occasions d’interagir avec d’autres personnes et d’observer d’autres personnes agir, semble permettre à celui-ci de développer son savoir-faire corporel. Le bébé démontre très tôt une sensibilité aux contingences sociales, ce qui lui permet, dès l’âge de 2 - 3 mois, d’être un agent à part entière dans les interactions engagées avec ses partenaires sociaux. D’une part, cet engagement actif semble alors offrir au bébé l’opportunité d’acquérir et exercer des compétences corporelles. D’autre part, il est possible que le bébé par cet engagement actif développe progressivement un sens de l’agentivité, lui permettant alors de s’engager dans des interactions sociales plus complexes (par ex. attention conjointe). De plus, l’apprentissage de nouvelles compétences corporelles par le bébé n’est pas limité à un apprentissage par essai-erreur — comme suggéré par exemple dans les travaux de Piaget (1936) — mais passe aussi par un apprentissage social (par imitation ou par observation des actions d’autrui),

cet apprentissage social étant même, dans certaines situations, plus efficace que la découverte par tentatives successives (Fagard et al., 2016).

6 Conclusion

Les études présentées dans cette revue de la littérature suggèrent que dès la naissance et même *in utero* le bébé est capable d'utiliser son corps de manière appropriée pour interagir avec le monde qui l'entoure. Ce « savoir-faire corporel » du bébé — à différencier de la conscience de soi démontrée par le jeune enfant à l'âge de 2 ans — s'enrichit et s'affine progressivement durant la première année de vie à travers l'exploration du corps, l'exploration de l'environnement physique et social. Ce savoir-faire corporel pourrait alors permettre au bébé d'acquérir un sens de l'agentivité (*sense of agency*) et un sens du corps propre (*body ownership*), et de ce fait, être le précurseur d'une connaissance explicite du corps. Le savoir-faire corporel possédé par le bébé dès les premiers temps de la vie jouerait ainsi un rôle essentiel dans le développement sociocognitif et psychomoteur de l'enfant.

Malgré cela, nous disposons actuellement de peu de connaissances sur les mécanismes sous-jacents au développement de ce savoir-faire corporel. Comme nous l'avons illustré précédemment (Section 2) et comme suggéré par les études présentées ci-dessus, deux mécanismes semblent être au cœur de ce développement : l'exploitation de la sensibilité aux contingences sensorimotrices et la motivation intrinsèque. Ainsi, il apparaît essentiel qu'à l'avenir des recherches soient menées afin de caractériser avec une plus grande précision ces deux mécanismes chez le bébé et leurs rôles dans la mise en place du savoir-faire corporel. De plus, la question du passage d'une utilisation pratique du corps à une connaissance explicite du corps puis à une réelle conscience de soi mérite d'être explorée plus en détail à travers de futurs travaux en neurosciences et psychologie du développement.

Remerciements

Cette publication a été réalisée avec le soutien du FET Open Grant 713010 "GOAL-Robots" et de l'ERC Grant 323674 "FEEL".

Chapitre 4

Development of body knowledge as measured by arm differentiation in infants: from global to local?

En révision à British Journal of Developmental Psychology (soumis en Mars 2019)

L'auteure de cette thèse a été aidée pour cette étude par différents membres de notre équipe dans le développement du matériel expérimental et l'analyse des données¹.

Authors. Lisa Jacquey, Sergiu T. Popescu, Judith Vergne, Jacqueline Fagard, Rana Esseily, and J. Kevin O'Regan

Abstract. The ability to perceive and use the body parts in an organised and differentiated manner is a precursor of body knowledge in infancy. To acquire this ability, the infant's brain might explore the perceptual consequences of its bodily actions. Undifferentiated body movements would gradually be replaced by more precise actions. Only a very few papers have tested this "global-to-local" hypothesis and none of them have so far been replicated. In this study, we assessed arm differentiation in 4-, 6- and 8-month-old infants using a new contingency detection task in which infants have to detect a contingency between one of their arms' activity and an audiovisual stimulus on a screen. We found that 4- to 8-month-old infants seem to be able to use their arms in a differentiated manner. However, surprisingly, we were not able to show a developmental trend in arm differentiation between 4 and 8 months of age.

Key words. Body knowledge; Sensorimotor contingencies; Infants

¹Un grand merci à Guglielmo Montone, Sergiu T. Popescu, Judith Vergne et Yasmine Bennani pour leur aide.

1 Introduction

During the first years of life, infants and toddlers progressively acquire the ability to perceive and use their body to interact efficiently with their physical and social environment (Piaget, 1936; Rochat & Goubet, 2000). While the importance of this ability in development cannot be disputed, its study is limited by certain difficulties. One problem is that authors have defined this ability in different ways, resulting in a multitude of overlapping concepts of body knowledge, such as body schema, body image(s), visuo-spatial body map, body semantics, etc. (see de Vignemont, 2010, for a review). Another problem is that often such notions refer to the concept of “mental representation”, whereas it is not clear what is meant by this, nor how to demonstrate its existence in infants. For these reasons we prefer in the present paper to coin a new term, namely “body know-how”, that we intend to be restricted to practical aspects of body knowledge that may not involve internal representations, and that may be constituted by a collection of skills. More precisely, we define “body know-how” as the ability to perceive and use the body parts in an organised and differentiated manner. In the present article we examine the hypothesis that body know-how develops from a global state where infants have fairly undifferentiated knowledge of their bodies, to a better localised form of know-how that allows infants to use their limbs in a differentiated manner. We investigated this hypothesis by assessing arm differentiation in 4-, 6- and 8-month-old infants using a new contingency detection task in which infants have to detect a contingency between one of their arms’ activity and an audiovisual stimulus on a screen. Before presenting our experiment, we start by reviewing studies investigating how during the fetal stage and early infancy sensitivity to sensorimotor and sensory-sensory contingencies supports the early development of body know-how. We then detail the few studies that more precisely document body know-how development in the first months of life.

1.1 Body know-how in early infancy

We hypothesize that the development of body know-how is rooted in infants’ sensitivity to the consequences of their actions (i.e., sensorimotor contingencies) and in the correspondence between events in different sensory modalities (i.e., sensory-sensory contingencies). Sensitivity to sensorimotor contingencies seems already to be present during the last three months of pregnancy and at birth, since fetuses and newborns seem implicitly aware of the consequences of some of their actions. For example, fetuses may open their mouths in anticipation when their hands approach their face (e.g., Myowa-Yamakoshi & Takeshita, 2006; see also Fagard et al., 2018; Reissland & Austen, 2018, for reviews) and 4-week-old infants distinguish their own spontaneous touch of their cheeks with one hand (actively self-touching) from when an experimenter touches their cheeks (external touch) (Rochat & Hespos, 1997). Around 2 months of age infants seem to become able to mod-

ulate sucking when this generates sensory changes (Rochat & Striano, 1999). Sensitivity to the correspondence between events in different sensory modalities might also play a role in the early development of body know-how. Indeed, infants' sensitivity to the correspondence between visual and tactile inputs of stimuli applied on their body seems already present at birth (Filippetti et al., 2013; Zmyj et al., 2011). Filippetti et al. (2013) showed one-day-old newborns videos of upright and inverted infant faces being touched on their cheeks either in synchrony or out of synchrony with actual stroking felt on the newborn's own face. The authors showed that the newborns preferred to look at synchronous visuo-tactile stimulation rather than asynchronous stimulation, but only in the upright face condition. The visuo-tactile integration observed in Filippetti's study has also been found for other body parts (legs) in 7- and 10-month-old infants (Zmyj et al., 2011). Moreover, infants' sensitivity to the correspondence between visual and proprioceptive feedback from their body movements seems to appear around 2-3 months of life. For example, from 3 months infants are able to discriminate contingent visual feedback caused by their body movements from (temporally or spatially) non-contingent visual feedback (e.g., Bahrick & Watson, 1985; Rochat & Morgan, 1995). In sum, these studies demonstrate that fetuses and very young infants possess coarse control of their body and may be sensitive to contingent feedback from their own movements and to the correspondence between events in different sensory modalities. However, these studies do not inform us about the degree to which infants know the precise structure of their bodies, in particular whether they use their body parts in a differentiated manner. Two types of approach have been used to answer this question: infants' responses to tactile stimuli and infants' sensitivity to sensorimotor contingencies.

1.1.1 Limb-differentiating responses to tactile stimuli

A first approach has been to measure infants' neural responses to tactile stimulations applied on different body parts. Thus, Meltzoff et al. (2018) and Saby et al. (2015) observed that from 2 months of age, evoked potential responses to touch stimulations on the mouth, hands and feet were organized somatotopically in a way similar to that found in adult brains. But to what extent does this neural organization have a behavioural correspondence? This has been studied via infants' motor responses to vibrotactile stimulation applied to different areas of the body. Thus, Somogyi et al. (2018) showed that infants' motor responses to vibrotactile stimulations become progressively organized in a topographical manner during the first months of life. In a longitudinal study from 3 to 6 months of age these authors stimulated infants with a vibrating buzzer applied to one hand or foot. They found that at 3 months infants responded with global movements of their body and, at 5-6 months, infants responded more specifically with the hand or foot stimulated by the buzzer. Other studies showed that already at the earliest ages tested (6 months for the hands and 4 months for the feet) infants can locate an unseen vibrotactile stimulus on the hands (Bremner et al., 2008)

and on the feet (Begum Ali et al., 2015). In these studies, infants showed more manual and visual orientation toward the stimulated limb compared to the non-stimulated limb. In summary, these studies tell us that at the neural level, infants' body know-how seems to be established from at least 2 months of age, since brain imagery in infants provides evidence of a topographical organisation of the body. However, on the behavioural side, current data indicate that body know-how becomes localised only around 4-6 months, suggesting that limb-differentiating responses at the behavioural level are established later than at the neural level. Nevertheless, this statement needs to be taken with caution, given that Bremner's team (Begum Ali et al., 2015; Bremner et al., 2008) showed evidence for local body know-how at the youngest age tested (4 months of age), and that younger infants have not yet been tested with the same protocol.

1.1.2 Limb-differentiating sensitivity to sensorimotor contingencies

Around 3-4 months infants are already able to produce task-specific actions with their limbs (for example knee flexion or extension) when these actions generate movements of a mobile above them (e.g., Angulo-Kinzler et al., 2002; Sargent et al., 2014; Thelen, 1994). But to what extent can infants specifically move one limb when only movements of this limb generate a contingent effect? Limb-differentiating sensitivity to sensorimotor contingencies was tested in very young infants by van der Meer (1997) and van der Meer et al. (1995, 1996) who showed that in some conditions, even 2-week-old infants can specifically move one arm in order to bring it into sight. In older infants, limb-differentiating sensitivity to sensorimotor contingencies has mainly been investigated using the "mobile paradigm". In this paradigm, one of the infant's limbs is attached to a mobile hanging over the infant's head in such a way that moving the limb makes the mobile move in a contingent manner (Rovee & Rovee, 1969). Using this method, it has been shown that 3- to 4-month-old infants can move one limb specifically when movements of this limb activate the mobile (Angulo-Kinzler, 2001; Heathcock et al., 2005; Rovee-Collier et al., 1978; Watanabe et al., 2011; Watanabe & Taga, 2006, 2009). More precisely, Watanabe & Taga (2006) found a developmental trend like that observed in Somogyi et al. (2018): when one arm was connected to the mobile, over the course of the experiment, 2-month-old infants increased the activity of their four limbs; 3-month-old infants increased the activity of their arms but not of their legs; and 4-month-old-infants increased the activity of the connected arm only. However, this ability of 3-4-month-old infants to use their limbs in a differentiated manner has not been replicated in other studies using the same paradigm: in Thelen (1994) the authors tested 3-month-old infants and found a difference between the connected and unconnected leg movements but only in velocity and not in frequency, and in Angulo-Kinzler et al. (2002) the authors did not find any difference between the connected and unconnected leg movements in 3-month-old infants. Thus, the existing literature does not allow us to conclude with confidence whether infants possess local body know how and are able to use their

limbs in a differentiated way from the age of 3-4 months, or whether this capacity only emerges later. In addition, a real understanding of the development of body know-how in young infancy would require data from infants over 4 months of age tested in sensorimotor contingency tasks, which is not available to our knowledge (probably because the mobile paradigm is not adapted to older babies — cf. [Hartshorn & Rovee-Collier \(1997\)](#)).

To sum up, this literature review suggests that body know-how develops in what might be called a “global-to-local” manner, i.e., from a state in which infants use their whole body in an undifferentiated way to a differentiated state in which infants are able to use their limbs independently of each other in an adapted way. Indeed, the studies mentioned above show that at first infants move their whole bodies, and that later they are able to move one specific limb in response to a stimulation (e.g., [Somogyi et al., 2018](#)) or when movements of this limb produce movements of a mobile above them (e.g., [Watanabe & Taga, 2006](#)). Nevertheless, the precise age at which infants come to possess well-established local body know-how requires further investigation. In particular, there is a lack of studies assessing body know-how in infants older than 4 months of age. In the current study, we will attempt to fill this gap by studying the development of body know-how between 4 to 8 months of age by exploiting infants’ sensitivity to sensorimotor contingencies.

1.2 The present study

In the present study, we exposed 4-, 6- and 8-month-old infants to a real-time contingency between movements of one of their arms and an audiovisual stimulation displayed on a screen. An age-matched control group saw an equally salient non-contingent audiovisual stimulation. We expected first to find a difference in activity between the infants in the contingent and non-contingent groups. We expected that this difference might consist in greater activity, and/or greater increase in activity over the course of the session in the contingent group than in the non-contingent group and that the difference between groups would increase with age. This difference in motor activity between the two groups is the behavioural measure we adopted as a sign of sensitivity to the sensorimotor contingency in infants in the contingent group. To observe such a difference was thus the first aim of the experiment. The second purpose was to test our hypothesis about body know-how development, i.e., that body know-how develops in what might be called a “global-to-local” manner. Testing this required examining to what extent 4, 6 and 8-month-old infants were able to use their arms in a differentiated manner, i.e., to restrict their movements to the particular arm that controlled the contingency. We expected that with age, infants would progressively become more able use the connected arm in a differentiated manner and would show greater activity and/or a greater increase in activity over the course of the session only in the connected arm.

2 Method

2.1 Participants

The participants were thirty-four 4-month-old infants (mean age = 125 days, SD = 6 days, range = 113–137 days), thirty-five 6-month-old infants (mean age = 184 days, SD = 8 days, range = 167–196 days) and thirty-five 8-month-old infants (mean age = 243 days, SD = 9 days, range = 226–259 days) (see Table 1 for details). Infants were recruited from a list of interested local middle- to upper-middle class families. Each family gave their written informed consent. The experimental protocol was approved by the University ethics committee. Infants were assigned to the contingent or non-contingent condition as they became available until a count of at least 16 infants per age and condition was reached. This number was chosen based on numbers used in similar paradigms (10 infants in Heathcock et al. (2005); 10 infants in Rovee-Collier et al. (1978); 16 infants in Watanabe & Taga (2006)). Twenty additional infants were tested, but had to be excluded due to fussiness (N=13), premature birth (N=2) or technical problems (N=5) (see Table 4.1 for details).

	Contingent group		Non-contingent group	
	<i>Included</i>	<i>Excluded</i>	<i>Included</i>	<i>Excluded</i>
4 months	17 infants 9 girls and 8 boys mean age = 121 days SD = 4 days range = [113-130]	2 infants Fussiness (N=2)	17 infants 9 girls and 8 boys mean age = 128 days SD = 6 days range = [119-137]	0 infant
6 months	18 infants 7 girls and 11 boys mean age = 186 days SD = 8 days range = [168-196]	2 infants Fussiness (N=1) Technical (N=1)	17 infants 3 girls and 14 boys mean age = 182 days SD = 9 days range = [167-195]	6 infants Fussiness (N=3) Prematurity (N=1) Technical (N=2)
8 months	17 infants 11 girls and 6 boys mean age = 240 days SD = 11 days range = [226-257]	8 infants Fussiness (N=5) Prematurity (N=1) Technical (N=2)	18 infants 7 girls and 11 boys mean age = 246 days SD = 6 days range = [236-259]	2 infants Fussiness (N=2)

Table 4.1 – Information on participants by group (contingent or non-contingent) and age (4, 6 or 8 months of age).

2.2 Experimental set-up

The experimental booth, constructed with ceiling-to-floor black curtains, contained a table covered with black fabric and a chair in front of which were placed a 23-inch computer screen and two loudspeakers placed symmetrically on either side of the screen. Two video cameras filmed the

infant from the front and above. During the experiment, infants were seated on a parent’s lap in front of the screen at approximately 60 cm. On each arm, infants wore a custom-made bracelet containing an accelerometer (Mbientlab, MetaWear RG) communicating via low-energy Bluetooth 4.0 with a computer (Figure 4.1).

2.3 Measure of instantaneous arm activity

The accelerometers sampled the acceleration of each arm, measured in units of g (the earth’s gravitational acceleration) in the x, y, and z directions, at a frequency of 50Hz, and the instantaneous acceleration at time t for each arm was calculated as the square root of the sum of the squares of the x, y and z values. This value was then low-pass filtered by computing: $value(t) = 0.015 \times value(t - 1) + 0.985 \times instantaneous\ acceleration(t)$. The weights 0.015 and 0.985 were chosen during a pilot study (32 infants tested) in order to reject peak values. We considered that this low-pass filtered acceleration value represented a measure of each arm’s “instantaneous activity”.

2.4 Contingent audiovisual stimulation

We used the “instantaneous activity” value to control an audiovisual stimulus so that it changed position on the screen in real time depending on movements of one of the infant’s arms (the connected arm), and was independent on the movements of the other arm (the unconnected arm). The contingent audiovisual stimulus (Figure 4.1) consisted of a highly salient red-and-yellow smiley on a black background accompanied by a 2-second 20 dB bell-sound obtained from an open-access sound bank. The smiley was continually visible on the screen, and its displacement was a function of the current “instantaneous activity” level as defined above. In this way, our contingency was similar to what would happen if our smiley was a real object moved by the force exerted on it by the connected arm. More precisely, the smiley’s motion was continuously subject to a “force” calculated from the activity of the connected arm and to a “friction” dependent on the displacement of the smiley itself. We used the equation: $next\ displacement\ (in\ pixels) = force\ coeff \times instantaneous\ activity - friction\ coeff \times previous\ displacement$. The coefficients of the force (0.004) and the friction (0.001) components were determined during pilot trials, and were kept the same for all infants. The direction of motion was not determined by the direction of arm motion, but changed randomly in a way so as to keep the smiley continually on the screen. The auditory contingency that accompanied the visual contingency consisted in a bell that sounded once every time the speed of the smiley on the screen passed a threshold value, and was only played again when the smiley had stopped moving and was then re-activated by the threshold being again passed. The threshold ($2\ pixels/20ms$) was determined during pilot trials, and was kept the same for all infants.

2.5 Design and procedure

2.5.1 Design

For each of the three age groups (4, 6 and 8 months), infants were randomly assigned to the contingent (experimental) group or the non-contingent (control) group, making a total of six groups. Infants in the contingent group were exposed to contingent audiovisual stimulation generated by movements of their connected arm (Figure 4.1). The side (right or left) of the connected arm was counterbalanced between infants. Infants in the non-contingent group were exposed to a comparable but non-contingent audiovisual stimulation. This non-contingent stimulation was specific to each age group and was made by taking the stimulation created by one of the infants of the same age in the contingent group. Indeed, in the non-contingent condition, the amounts of movement of the smiley and of sounds increased over time and corresponded to the expected outcome in the contingent condition. This ensured the same amount of arousal in both conditions.

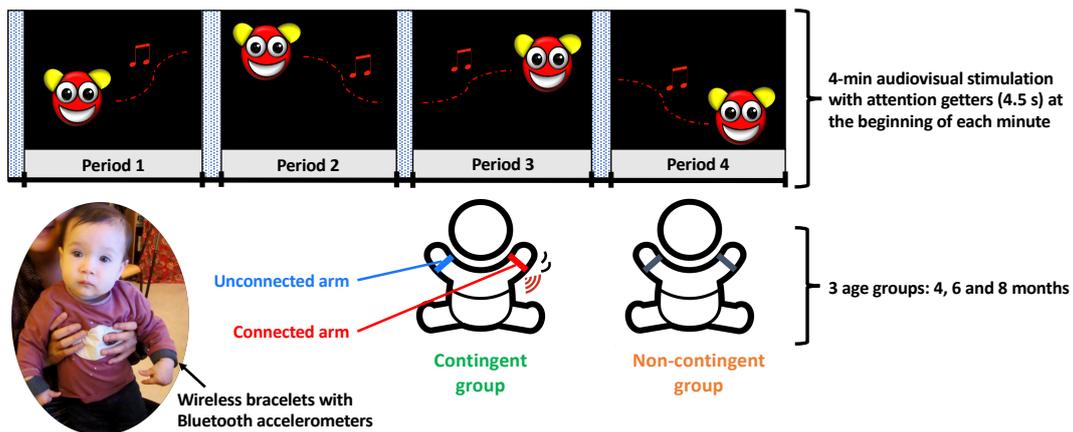


Figure 4.1 – We exposed 4-, 6- and 8-month-old infants to a real-time contingency between movements of one of their arms (connected arm) and an audiovisual stimulation displayed on a screen. The side (right or left) of the connected arm was counterbalanced between infants. Arm movements were measured at 50 Hz by Bluetooth-connected accelerometers worn on the baby’s wrists. The experiment lasted 4 minutes separated into four periods of 55.5 seconds each. Before the beginning of each period an attention-getter of duration 4.5 seconds occurred, consisting of an expanding white disc displayed on the screen, accompanied by a metallic sound. Age-matched control groups were provided with an equally salient non-contingent audiovisual stimulation. We compared: (i) arm activity in the contingent group versus the non-contingent group and (ii) for the contingent group alone, arm activity of the connected arm versus the unconnected arm.

2.5.2 Procedure

Infants were seated on their parents’ lap in front of the screen and exposed to the contingent or non-contingent audiovisual stimulation for four minutes. We opted for a 4-minute experiment because, on the basis of a pilot study, we considered this duration as an optimal balance between

a sufficient contingency exposure and a time period that was short enough not to exclude too many babies because of fussiness. In order to maintain the infant’s attention, an attention-getter consisting of a bright expanding white disc accompanied by a jangling keys sound was displayed at the centre of the screen for 4.5 seconds before the beginning of each period. The experiment was thus divided into four periods of 55.5 seconds that we analysed separately in order to evaluate the evolution of the infant’s behaviour over the course of the experiment. Parents were instructed to hold their infant at the waist so that both her or his arms were free, and to maintain the infant seated as much as possible. Parents were also instructed not to interact with their infant and to look down away from the screen during the experiment.

2.6 Data processing

2.6.1 Coding of looking time

The videos were analysed frame by frame using `Psycode` to ensure that infants were attentive to the experiment in each group. A second observer coded 30% of the infants’ videos offline. The percentage agreement on infants’ looking times between the two observers averaged 95%.

2.6.2 Arm activity

We averaged the instantaneous activity of each arm (see definition above) and the mean instantaneous activity of both arms (we will call this the “combined arm activity”) over each of the four periods of the experiment (55.5 seconds). For the contingency sensitivity assessment, we based our analysis on combined arm activity because in the non-contingent group there is no connected or unconnected arm, and for the assessment of arm differentiation we based our analysis separately on the connected arm and unconnected arm activities.

3 Results

3.1 Looking time analysis

The looking time analysis confirmed that there was no difference in looking time across contingent and non-contingent groups ($F(1, 103) = .076, p = .783$) and no difference across age groups ($F(2, 102) = 2.119, p = .126$) or interaction ($F(2, 102) = 1.466, p = .236$). It should be noted here that the time and direction of infants’ gaze could also have been used as indicators of infants’ sensitivity to contingency and/or of their ability to use their arms in a differentiated manner. Nevertheless, without eye-tracking data, it was impossible to accurately determine the direction of the gaze from our video records. We did however note that during the experiments infants very rarely looked at their arms, whether in the contingent or non-contingent group, which seems

to be confirmed by the small proportions of off-screen looking times in each group (23% in the contingent group and 25% in the non-contingent group).

3.2 Main results

3.2.1 Contingency sensitivity assessment

Figure 2 presents results of infants' combined arm activity over the four periods of the experiment for each group (contingent group in green and non-contingent group in orange) for all infants (Figure 4.2a) and at each age (Figure 4.2b). We expected that infants in the contingent group would show higher combined arm activity (calculated as the mean of both arms' activity) and/or higher increase in combined arm activity over the experiment compared to infants in the non-contingent group. We also expected that this difference in arm activity between infants in the contingent and the non-contingent group would gradually increase with age (4, 6 and 8 months of age).

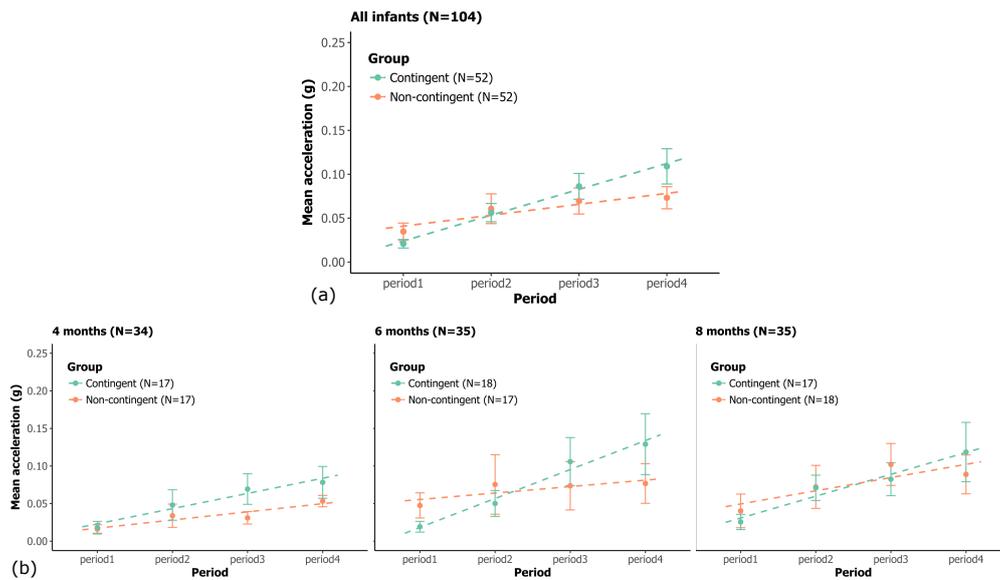


Figure 4.2 – Means and standard errors of the mean of the combined arm activity (calculated as the mean of both arms' activity) over the four periods of the experiment and the corresponding regression lines (dashed) for the contingent group (green) and the non-contingent group (orange). (a) All infants (b) Separated by age (4, 6 and 8 months).

We see in the top graph with all infants (Figure 4.2a) that combined arm activity increases over the course of the experiment in both groups and that the rate of increase of combined arm activity over the course of the experiment is higher in the contingent group as compared to the non-contingent group. This is confirmed in a repeated measures ANOVA by a significant main effect of period ($F(2.139, 209.625) = 19.029, p < .0001, \eta^2 p = .163$) and a significant interaction between period and group ($F(2.139, 209.625) = 3.107, p = .043, \eta^2 p = .031$). There is no significant main effect of group ($F(1, 98) = .288, p = .593$). In order to better understand the significant interaction between period and group, we performed linear regressions for the combined arm activity of each infant over the four periods of the experiment, and calculated the mean of the slopes of the regressions for each group (contingent and non-contingent). Using a one-tailed t-test, we tested the hypothesis that the means in the contingent group would be higher than in the non-contingent group. We found a significant difference in slopes of combined arm activity between the contingent and the non-contingent groups ($t(102) = 1.123, p = .013$). The mean of the slopes of combined arm activity in the contingent group was 0.3 ($s.e.m = .046$), meaning that the combined arm activity's mean in this group increased by 30% at each period of the experiment, going from 0.021 to 0.109 between the first and the last period. In the non-contingent group, the mean of the slopes of combined arm activity was 0.1 ($s.e.m = .031$), which means that the mean combined arm activity in this group increased by 10% at each period of the experiment, going from 0.035 to 0.073 between the first and the last period.

The lower graphs (Figure 4.2b) show the results separately for the three age groups. The slopes are slightly different between age groups, but this difference is not significant, as the ANOVA shows no effect of age ($F(2, 98) = 1.533, p = .221$), no interaction between group and age ($F(2, 98) = .144, p = .866$) and no interaction between period, group and age ($F(4.278, 209.625) = .991, p = .417$).

Results of this first analysis allowed us to explore the differences between the contingent and non-contingent groups in terms of combined arm activity - which was the subject of our hypotheses. However, it is likely that behavioural differences between the two groups may also be observed in the activity of each arm. For this reason, we conducted an analysis comparing the evolution of infants' right and left arm activity by period, group and age. Note that this analysis was not planned before the experiment. The repeated measures ANOVA showed no main effect of group ($F(1, 98) = .288, p = .593$), no main effect of arm ($F(1, 98) = .023, p = .879$), no interaction between arm and group ($F(1, 98) = .105, p = .747$), and no interaction between period, arm and group ($F(2.336, 228.918) = .812, p = .462$). Moreover, the ANOVA showed no effect of age ($F(2, 98) = 1.553, p = .221$), no interaction between arm, group and age ($F(2, 98) = .601, p = .550$), and no interaction between period, arm, group and age ($F(4.672, 228.918) = 2.03, p = .954$). These results suggest that there is no difference in right/left arm activity between the contingent group and the non-contingent group.

3.2.2 Assessment of arm differentiation

In this section, we present only results for the contingent group. We expected that infants who narrowed down the contingency to their connected arm should show higher arm activity or a higher increase over the experiment in arm activity for the connected arm than for the unconnected arm. We also expected that this difference in activity between the connected and the unconnected arm would gradually increase with age (4, 6 and 8 months of age). Figure 3 presents infants' mean arm activity over the four periods of the experiment for each arm (connected arm in red and unconnected arm in blue) for all infants (Figure 4.3a) and at each age (Figure 4.3b).

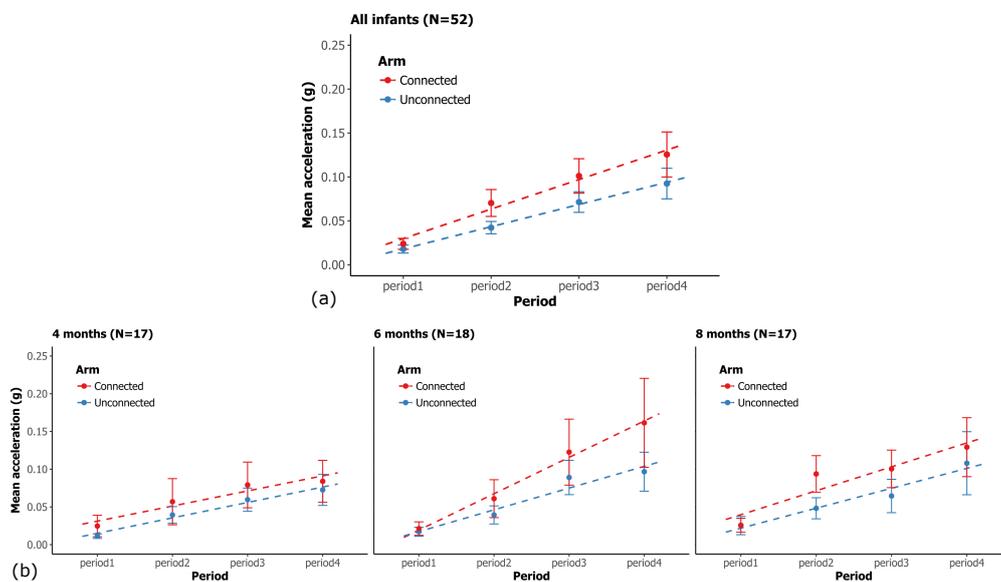


Figure 4.3 – Means and standard errors of the mean of each arm's activity over the four periods of the experiment and the corresponding regression lines (dashed) for the connected arm (red) and the unconnected arm (blue). (a) All infants (b) Separated by age (4, 6 and 8 months).

We see in the top graph with all infants (Figure 4.3a) that both arm activities increase over the course of the experiment and that the connected arm's activity is globally greater than the unconnected arm's activity. Indeed, the ANOVA shows a significant main effect of period ($F(1.655, 81.08) = 15.38, p < .0001, \eta^2 p = .358$) and a significant main effect of arm ($F(1, 49) = 5.154, p = .028, \eta^2 p = .095$). We did not find an interaction between period and arm ($F(2.07, 101.428) = 2.146, p = .120$), suggesting that each arm activity increased equally over time. In the lower graphs (Figure 4.3b), we see the same pattern for all age groups. The ANOVA shows no effect of age ($F(2, 49) = .435, p = .650$), no interaction between arm and age ($F(2, 49) = .185, p = .831$), and no interaction between period, arm and age ($F(4.140, 101.428) = 1.471, p = .215$). This lack of effect was also confirmed in a supplementary analysis on the rates of increase of the means of the infants' individual arm activity over the four periods of the experiment.

Moreover, in order to determine whether the difference in activity between the two arms (connected and unconnected) observed in the contingent group was due to exposure to the contingency, we conducted a similar analysis to compare activity between the two arms (right and left) in the non-contingent group. Note that this analysis was not planned before the experiment. The repeated measures ANOVA showed no significant main effect of arm ($F(1, 49) = .011$, $p = .916$) and no interaction between period and arm ($F(2.139, 104.787) = .525$, $p = .605$). Moreover, the ANOVA shows no effect of age ($F(2, 49) = 1.191$, $p = .312$), no interaction between arm and age ($F(2, 49) = .493$, $p = .614$), and no interaction between period, arm and age ($F(4.277, 104.787) = 1.231$, $p = .302$). These results suggest that there is no difference in arm activity (right vs. left) in the non-contingent group, in contrast to the difference in arm activity (connected vs. non-connected) observed in the contingent group.

4 Discussion

The first aim of the present study was to investigate whether 4-, 6- and 8-month-old infants would demonstrate sensitivity to a contingency between movements of one of their arms and an audiovisual stimulation. To check for this, we compared the infants' overall arm activity to the arm activity of a control group that saw an equally salient but non-contingent audiovisual stimulation. It is important to point out here that we consider the motor response given by an infant when exposed to a sensorimotor contingency as an indicator of the infant's sensitivity to this sensorimotor contingency. We confirmed that infants were sensitive to the contingency. This sensitivity did not manifest itself as a higher overall arm activity in the contingent group but only as a greater increase of arm activity over the course of the experiment in the contingent group compared to the non-contingent group. This can be explained by supposing that whereas both groups of infants increased their general arousal over the course of the experiment, infants in the contingent group gradually discovered the contingency and so started moving more as compared to the non-contingent group. Interestingly, contrary to what we expected, we found no evidence that older infants were more sensitive to the contingency than younger ones. The second purpose of our experiment was to assess whether the infants would be able to use their arms in a differentiated manner. We found evidence for arm differentiation when age groups 4, 6 and 8 were taken together: overall, infants moved the connected arm more than the other (unconnected) arm. However, again surprisingly, we had no evidence for progression of this differentiation with age. We shall now discuss these results in more detail.

4.1 Sensitivity to sensorimotor contingencies

Our finding that infants were sensitive to our contingency — suggested by the difference in motor activity observed between the contingent group and the non-contingent group — is consistent with previous findings (e.g., DeCasper & Fifer, 1980; Rovee & Rovee, 1969; Watson, 1972). It is worth noting that our study differs from previous works by the fact that it is the first time sensitivity to contingencies has been demonstrated using wireless accelerometers. Wireless accelerometers are a promising new tool that can be used on infants over a wide range of ages. They provide a convenient measure of motor activity and can be used to establish a variety of types of contingent stimulation (e.g., adding delays between action and feedback, testing feedback in different sensory modalities, etc.).

The result showing no statistical difference in sensitivity to the contingency across age groups is surprising. An explanation might be that the kinds of contingencies that infants are sensitive to change as a function of age (Bahrick & Watson, 1985). Indeed, at 8 months, infants are particularly interested in reaching and grasping, and spend considerable time exploring their environment via the proximal contingencies involved in hand manipulation (see, for instance, Palmer, 1989; Ruff, 1984). However, the contingency used in our study involved no hand manipulation and was distal. This might have prevented 8-month-olds from showing more sensitivity to the contingency as compared to 6- and 4-month-old infants. This might be interesting to test in future studies.

4.2 Assessment of arm differentiation

Our results show evidence that infants are able to move the particular arm that controlled the contingency more than the other arm. This is broadly compatible with other studies showing limb differentiation in infants as early as 3-4 months of age (Angulo-Kinzler, 2001; Heathcock et al., 2005; Rovee-Collier et al., 1978; Watanabe et al., 2011; Watanabe & Taga, 2006, 2009). However, the difference between the connected and the unconnected arm did not increase across time during the experiment, neither did it increase across age, contrary to other published studies (e.g., Heathcock et al., 2005; Watanabe & Taga, 2006). Presumably this difference derives from differences in methodologies, that we discuss below.

A first difference between our protocol and protocols of other studies using the mobile paradigm concerns the type of contingent feedback involved. In other studies, an infant's arm or leg is attached to the mobile with a ribbon. This provides local tactile stimulation every time the infant moves its connected arm or leg. This was not the case in our experiment, where our wireless technology provided no local tactile feedback to the infant's limb. The presence of co-located tactile feedback might influence the ability of young infants to narrow down a contingency to a specific limb, and this may account for why the signs of differentiation we observed (i.e., a stable difference in activity between the connected and the unconnected arm) differ from those found

in the literature (i.e., an increasing difference between the connected and the unconnected arm across time during the experiment). This hypothesis is supported by the fact that the other existing experiment on limb differentiation using a digital link also revealed divergent results from the rest of the literature, as the authors even failed to show evidence of limb differentiation at 3-4-months of age (Angulo-Kinzler et al., 2002). Thus, the distinction between co-located versus distal feedback would be interesting to test in future studies.

A second difference in our protocol compared to others is related to the shorter overall duration of exposure to the contingency (about 4 minutes in our experiment instead of 6 to 15 minutes during one or several sessions in studies using other protocols). This might have allowed infants less opportunity to narrow down the contingency to their connected arm. This hypothesis is supported by the results of Rovee-Collier et al. (1978) in which it is only at the end of the exposure to the contingency (4 days) that all infants showed limb differentiation. Thus, we can suppose that if infants had had more time to explore our contingency, we might possibly have found evidence of limb differentiation comparable to that obtained in the literature.

A last explanation might come from the threshold for triggering the stimulation in our setup. Indeed, in our setup, even a very small acceleration of the connected arm produced an effect, whereas in the classical mobile paradigm only large flexion-extension movements of the limb produced an effect (e.g., in Watanabe & Taga, 2006). Thus, in our setup the contingent effect could have been produced by any arbitrary body movement provided that it resulted in a small movement of the connected arm. To check for this, we did a qualitative analysis of the videos in order to see if some infants in the contingent group repetitively adopted some particular specific action, other than moving the connected arm and that might have triggered the audiovisual stimulus. We called such alternative triggering behaviour “stereotypical behaviour”, because it necessarily involved several repetitions of the same behaviour, whatever it was. The analysis was conducted for all infants, and the coder was not aware of the age (4, 6 or 8 months), the group (contingent or non-contingent) nor of which arm (if any) was connected. All infant’s repeated actions with a clear anticipatory behaviour toward the audiovisual effect were coded (e.g., the infant starts to kick only when the audiovisual feedback goes off, and looks at the screen in anticipation before the smiley moves). We identified five such movements: making large head movements from right to left, moving both arms, kicking, vocalizing and moving the upper body. This supplementary qualitative analysis suggested that none of the infants in the non-contingent group presented stereotypical behaviour but some infants in the contingent group indeed used an alternative action while exploring the sensorimotor contingency. These behaviours were mainly observed in the older infants (N=7 at 6 months and N=7 at 8 months) and less in the younger infants (N=2 at 4 months). Though debatable, there is a way of interpreting this result as being compatible with the hypothesis that body know-how develops from global to local. It could be that even though older infants are not

able to correctly localize the connected body part, at least they are systematically and repetitively moving a specific body part, contrary to younger infants that indiscriminately move their whole bodies. Moreover, this supplementary qualitative analysis raises a methodological point regarding the threshold setting. On the one hand, using a very low threshold seems to facilitate contingency detection in that it gives the infant the opportunity to discover the contingency by chance. On the other hand, a high threshold would facilitate the production of a specific local response (Watson, 1972; Zwicker et al., 2012). The question of which threshold to choose remains open.

5 Conclusion

Our paper provides new insights into the development of body knowledge during early infancy. Based on the hypothesis that body know-how — the ability to perceive and use the body parts in an organised and differentiated manner — develops from global to local in the first month of life, our aim was to address the lack of studies on limb differentiation in infants older than 4 months. We demonstrated that 4- to 8-month-old infants seem able to use their arms in a differentiated manner when movements of only one of their arms generate a contingent audiovisual feedback. However, we were not able to show a developmental trend in arm differentiation between 4 and 8 months of age. In future work, it will be interesting first to test younger infants so as to determine at what moment the global to local transition in body know-how occurs. Second, it will be interesting to test how the kinds of contingencies (e.g., analogue vs. digital, local vs. distal or haptic vs. non-haptic contingencies) that infants are best at detecting and narrowing down depend on the infants' age and/or motor abilities. The wireless technology using Bluetooth accelerometers developed in this study appears to be a good tool to create such adaptable contingencies. To conclude, further work is needed to better understand how body know-how develops and is fine-tuned over the first year of life so as to provide the properly differentiated sense of the body essential for interacting with the physical and social world.

Acknowledgments

The authors gratefully acknowledge the support of FET Open Grant 713010 “GOAL-Robots” and ERC Grant 323674 “FEEL”. We would like to thank Christine Walter for sewing the bracelets, Guglielmo Montone for his assistance in constructing the experimental booth and in computer coding and Yasmine Bennani for her precious assistance in data coding. Our special thanks to all parents and infants who participated in this study.

Chapitre 5

Série d'études pilotes

Chapitre non soumis à la publication

La série d'études pilotes présentée dans ce chapitre a été réalisée par plusieurs membres de notre équipe, dont l'auteur de cette thèse¹. Le codage et l'analyse des données ont été réalisés par l'auteur de cette thèse, avec l'aide de deux autres membres de notre équipe pour un second codage.

¹Cette série d'études pilotes a été réalisée dans le cadre d'un projet mené par Sergiu T. Popescu, projet dans lequel sont impliquées Judith Vergne, Alice Dauphin, Yasmine Bennani et l'auteur.

1 Introduction

Nous avons présenté au chapitre précédent ([Chapitre 4](#)) un protocole expérimental consistant à exposer un bébé à une stimulation audiovisuelle contingente aux mouvements de l'un de ses bras. Nous avons pour ambition d'exploiter ce protocole afin de réaliser une série d'études sur la sensibilité aux contingences sensorimotrices et le développement du savoir-faire corporel chez le bébé âgé de moins d'un an. Nous avons alors entrepris de vérifier la robustesse de notre protocole en nous appuyant sur les résultats de l'étude présentée au [Chapitre 4](#). Cette analyse des résultats a suggéré que notre protocole expérimental n'était pas assez robuste. Premièrement, les effets que nous avons obtenus n'étaient pas massifs, aussi bien pour la sensibilité à la contingence que pour la différenciation entre les bras (voir la [Section 3](#) du [Chapitre 4](#)). Deuxièmement, nous n'avons pas obtenu de discrimination entre les âges, ni pour la sensibilité à la contingence, ni pour la différenciation entre les bras. Ces deux constats font que nous avons préféré ne pas adopter ce protocole expérimental comme base de nos futurs travaux. En effet, employer ce protocole présentait le risque que nous ne puissions pas interpréter une absence de différence de résultats entre deux conditions ou deux groupes d'âges, cette absence de différence pouvant alors être le reflet d'une réelle absence de différence dans la population générale, ou le reflet de l'incapacité de notre protocole à rendre compte de cette différence chez la population testée en laboratoire. Nous avons confirmé la faible robustesse de notre protocole par une analyse vidéo des données comportementales de l'étude présentée au [Chapitre 4](#). L'analyse effectuée consistait pour le codeur à déterminer de manière subjective pour chaque bébé s'il avait « oui, « peut-être » ou « non » détecté la contingence. Cette analyse a été réalisée par un codeur n'ayant pas connaissance de l'âge, du groupe (contingent ou non-contingent) et, si applicable, du bras « connecté » des bébés. Selon cette analyse subjective, seuls 34% des bébés du groupe contingent auraient détecté la contingence (28% ayant peut-être détecté la contingence et 38% ne l'ayant pas détectée selon ce codage).

Ainsi, face à l'impossibilité d'exploiter pour de futurs travaux le protocole présenté au [Chapitre 4](#), nous avons cherché à travers une série d'études pilotes à transformer ce protocole initial. Notre objectif était alors d'obtenir un protocole pour lequel des bébés âgés de moins d'un an montreraient des signes évidents de sensibilité à la contingence impliquée. Nous avons pour cela défini une nouvelle méthode de mesure permettant de déterminer pour chaque bébé un degré de détection et un degré différenciation de la contingence impliquée. Ce chapitre présente les douze études pilotes ayant été menées (notées de A à L), ainsi que l'exploitation des données récoltées dans le but de répondre à différentes questions relatives à la sensibilité aux contingences sensorimotrices et au développement du savoir-faire corporel chez le bébé. Le [Tableau 5.4](#) ci-dessous offre une brève présentation de chaque étude pilote.

2 Méthode

2.1 Participants

131 bébés âgés de 3 à 9 mois ont participé à cette série d'études pilotes. Les groupes de bébés correspondant à chaque étude pilote n'ont pas été homogénéisés en âge ou sexe. 98 bébés ont été inclus dans les analyses, les 33 autres bébés ayant été exclus pour cause d'absence de données (N=15), de problèmes expérimentaux (N=11) ou de pleurs dès le début de l'expérience (N=7). Parmi les bébés que nous avons testés, certains avaient effectué une autre étude au sein du laboratoire au cours de la demi-heure précédant notre étude (électroencéphalographie, procédure de la *Head Turn Preference*, oculométrie, etc.). Ces bébés et les bébés ayant participé uniquement à notre étude ont été inclus sans distinction dans les analyses, du fait du faible nombre de bébés au sein de chaque étude pilote.

2.2 Procédure

Les dix études pilotes menées au laboratoire (voir Tableau 5.4) ont toutes été réalisées dans le même box expérimental (voir Chapitre 4 pour une description détaillée et Figure 5.1a pour une illustration). Pour ces études, le bébé était placé sur les genoux d'un de ses parents. Un écran (23 pouces) était positionné à 60 cm en face du bébé et deux écrans (23 pouces) étaient positionnés de chaque côté du bébé à proximité de ses bras. Les écrans utilisés variaient en fonction de l'étude pilote, les écrans non-utilisés étant alors recouverts d'un drap noir. L'expérience n'avait pas de durée prédéfinie et continuait tant que le bébé semble calme et attentif. Les études pilotes réalisées au laboratoire ont été menées par cinq expérimentateurs différents dont l'auteure de cette thèse.

Les deux études pilotes réalisées à domicile (voir Tableau 5.4) ont respecté un design expérimental commun. Les bébés ont été rencontrés à leur domicile à heure fixe durant trois à cinq jours consécutifs en respectant la procédure suivante : le bébé était installé dans un porte-bébé sur l'un de ses parents et était placé devant un ordinateur portable (13 pouces) situé à 45 cm. L'expérimentateur était positionné hors de la vue du bébé (voir Figure 5.1b pour une illustration). La durée maximale de l'expérience était de 10 minutes, mais celle-ci était arrêtée avant si le bébé montrait des signes de frustration préalables. Les deux études pilotes réalisées à domicile ont été menées par l'auteure de cette thèse.

Pour l'ensemble des études, les bébés portaient des bracelets aux poignets, mesurant l'activité de leurs bras afin de créer une contingence entre les mouvements des deux bras ou de l'un des deux bras (bras « connecté ») et une stimulation audiovisuelle. Les bracelets utilisés variaient entre les études pilotes (voir ci-dessous Section 2.3). Le bras « connecté », si applicable, était contrebalancé entre les bébés au sein d'une même étude.

2.3 Mesure de l'activité instantanée des bras

Pour les pilotes A à G (voir Tableau 5.4), la mesure d'activité utilisée pour déclencher la stimulation audiovisuelle a été réalisée avec les mêmes bracelet-accéléromètres que ceux présentés au Chapitre 4 (Mbientlab, MetaWear RG) (Figure 5.1c pour une illustration). La stimulation audiovisuelle et le seuil d'activation étaient propres à chaque étude (voir Tableau 5.4). Pour l'étude pilote H (voir Tableau 5.4), des bracelets « mécaniques », c'est-à-dire sans contrôle numérique de la contingence, ont été utilisés (voir description détaillée dans la section « Pilote H », Section 3.3.2 et Figure 5.1d pour une illustration). Enfin, pour les pilotes I à L (voir Tableau 5.4), de nouveaux bracelet-accéléromètres ont été utilisés (Micro:bit, voir une description détaillée dans la section « Pilote I », Section 3.3.3 et Figure 5.1e pour une illustration).

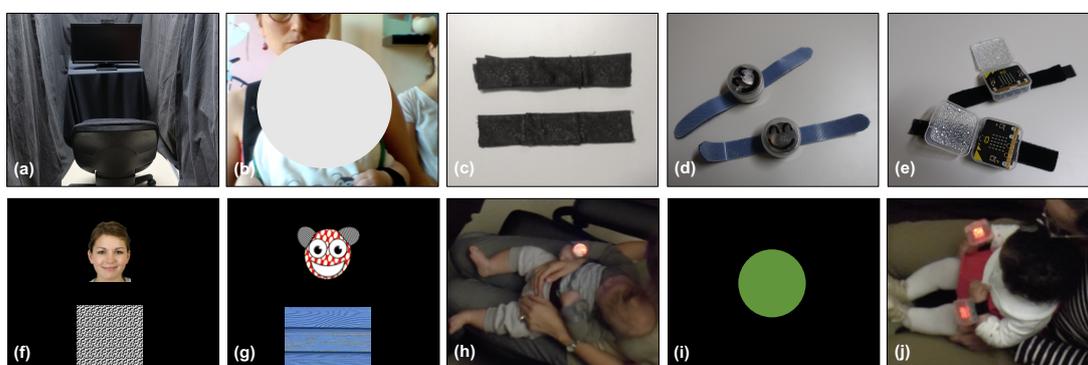


Figure 5.1 – (a) Box expérimental dans lequel a été réalisé l'ensemble des études pilotes menées au laboratoire (tous les études pilotes sauf E et F). (b) Exemple d'installation à domicile (Pilotes E et F). (c) MetaWear RG, bracelets utilisés pour enregistrer les données d'accélération dans les Pilotes A à F et H. (d) bracelets mécaniques, bracelets utilisés pour le retour sensoriel dans le Pilote G. (e) Micro:bit, bracelets utilisés pour enregistrer les données d'accélération et pour le retour sensoriel dans les Pilotes I à L. (f) Stimulation audiovisuelle utilisée pour le Pilote A. (g) Stimulation audiovisuelle utilisée pour les Pilote B à F. (h) Stimulation audiovisuelle utilisée pour le Pilote G. (i) Stimulation audiovisuelle utilisée pour le Pilote H. (j) Stimulation audiovisuelle utilisée pour les Pilotes I à L.

2.4 Contingences sensorimotrices

Pour rappel, notre protocole initial consistait en une contingence entre les mouvements du bras « connecté » du bébé (bras contrebalancé entre les bébés) et les mouvements d'un smiley sur un écran, accompagnés d'un son. La vitesse et la durée des mouvements du smiley à l'écran étaient proportionnels à l'accélération du bras « connecté » du bébé, mais leur direction n'était pas liée à la direction des mouvements du bébé. Le son était déclenché lorsque l'accélération du bras « connecté » franchissait un certain seuil. L'exposition à la contingence durait quatre minutes : le bébé était installé sur les genoux de l'un de ses parents à 60 cm d'un écran d'ordinateur, dans

un box expérimental composé de trois rideaux noirs. Afin de mettre en place une version plus robuste de ce protocole, nous avons créé au fur et à mesure de notre série d'étude dix contingences successives différentes (dont deux ont été testées au laboratoire et à domicile, ce qui équivaut à douze études pilotes). Le choix des différentes contingences a été réalisé grâce à une étude préliminaire menée chez des adolescents et des adultes et à partir de la revue de la littérature présentée au [Chapitre 1](#).

2.4.1 Étude préliminaire

Nous avons expérimenté notre protocole initial auprès de 6 participants enfants, adolescents et adultes, afin de (i) déterminer s'ils étaient capables de détecter la contingence impliquée et de l'affiner au bras « connecté » et de (ii) les questionner sur les difficultés qu'ils auraient pu rencontrer à le faire. 100% des participants ont été capables en quelques minutes de détecter puis d'affiner la contingence. Cependant, malgré leur réussite, les participants ont tous rapporté deux aspects de la contingence qui les avaient gênés dans la réalisation de la tâche : premièrement, le fait que la contingence auditive et la contingence visuelle divergent — pour rappel, la contingence auditive était digitale (on/off), alors que la contingence visuelle était analogique (proportionnelle à l'accélération du bras « connecté ») — et deuxièmement, le fait que la direction du mouvement du stimulus à l'écran et des mouvements du bras « connecté » ne soient pas en lien. Afin de pallier ces deux faiblesses, toutes les contingences que nous avons utilisées pour notre série d'études pilotes présentaient :

- Une cohérence entre la contingence auditive et la contingence visuelle prenant la forme d'une contingence audiovisuelle digitale : tout mouvement du bébé au-dessus du seuil, quelle que soit son accélération, entraînait l'apparition d'une même stimulation audiovisuelle prédéfinie (sauf Pilote G, voir [Section 3.3.1](#)).
- Un lien clair entre les mouvements du bébé et les mouvements de la stimulation visuelle : soit une absence de lien (la stimulation visuelle présentait toujours le même mouvement ou la stimulation visuelle était statique), soit un lien « parfait » (la stimulation audiovisuelle provenait d'un boîtier placé sur le poignet du bébé).

2.4.2 Variations subséquentes

Nous avons ensuite identifié à partir de la revue présentée au [Chapitre 1](#) quatre paramètres pouvant être manipulés afin d'optimiser notre protocole initial : les conditions d'exposition, le nombre de sessions d'apprentissage, la saillance de l'action contingente et le paramètre spatial de la contingence. Ces paramètres et les différentes variations que nous avons utilisées sont présentés dans le [Tableau 5.1](#) (voir [Figure 5.1f:j](#) pour une illustration des stimulations visuelles). Les détails de

la procédure utilisée au sein de chaque étude pilote sont présentés à la [Section 3](#) et résumés dans le [Tableau 5.4](#).

2.5 Analyse des données

Afin de déterminer la robustesse du protocole mis en place au sein de chaque étude pilote et son intérêt pour la suite de nos travaux, un codage vidéo de la (ou les) session(s) d'exposition à la contingence a été réalisé pour chaque bébé. Ce codage vidéo a été effectué par l'auteure de cette thèse. Nous avons choisi de mettre en place un codage vidéo plutôt que d'exploiter les données d'accélération des mouvements de bras du bébé (méthode employée précédemment, voir [Chapitre 4](#)) car nous avons entre temps identifié des limites à l'utilisation exclusive des données d'accélération (voir [Section 2.1](#) de la discussion générale).

2.5.1 Mesure des capacités de détection et de différenciation

Le codage vidéo a été réalisé à partir d'une grille de cotation des comportements (voir [Tableau 5.2](#)) mise en place suite à l'analyse vidéo réalisée pour l'étude du [Chapitre 4](#). Cette grille de cotation permettait d'octroyer à chaque bébé un « score de détection » de la contingence (noté $Score_{det}$) et un « score de différenciation » de la contingence (noté $Score_{dif}$). Le détail du calcul de ces scores est présenté ci-après.

- **Score de détection ($Score_{det}$)** : le score de détection reflète la capacité du bébé à avoir détecté la contingence impliquée dans la tâche. Ainsi, l'action identifiée comme contingente par le bébé n'est pas considérée pour le calcul de ce score. Par exemple, un bébé ayant détecté une contingence entre son bras « connecté » et la stimulation audiovisuelle et un bébé ayant détecté une contingence entre les mouvements de tout son corps et la stimulation audiovisuelle se verront attribuer le même score de détection.
- **Score de différenciation ($Score_{dif}$)** : le score de différenciation reflète la capacité du bébé à avoir différencié l'action impliquée dans la contingente. Dans l'exemple précédent, les deux bébés se verront attribuer des scores différents : le bébé ayant exploré la contingence par des mouvements du bras « connecté » aura un score plus élevé que le bébé ayant exploré la contingence par des mouvements de tout le corps.

Conditions d'exposition	<p>Laboratoire : Les bébés sont rencontrés au laboratoire - Tous les Pilotes sauf E et F.</p> <p>Domicile : Les bébés sont rencontrés à domicile - Pilotes E et F.</p>
Nombre de sessions	<p>Une session : Les bébés sont rencontrés pour une seule session - Tous les Pilotes sauf E et F.</p> <p>Plusieurs sessions : Les bébés sont rencontrés tous les jours à la même heure pendant 3 à 5 jours - Pilotes E et F.</p>
Saillance de l'action contingente	<p><i>Seuil</i></p> <p>Fixe : Le seuil est fixe durant la totalité de la séance. Celui-ci est soit commun à tous les bébés, soit calculé pour chaque bébé durant une phase de niveau de base - Études pilotes A, B, C, E, G, H, I et K.</p> <p>Adaptatif : Le seuil peut être modifié en temps réel par l'expérimentateur, ou augmente après chaque occurrence de la contingence (seuil adaptatif préprogrammé) - Études pilotes D, F, J et L.</p> <p><i>Bras "connecté"</i></p> <p>2 bras : Les mouvements des deux bras du bébé déclenchent la stimulation audiovisuelle - Études pilotes A, B.</p> <p>1 bras : Les mouvements d'un seul des deux bras du bébé déclenchent la stimulation audiovisuelle - Études pilotes C, E, G, H, I, J, K et L.</p> <p>Variable : L'expérimentateur peut choisir en temps réel si les mouvements d'un seul ou des deux bras du bébé déclenchent la stimulation audiovisuelle - Études pilotes D et F.</p> <p><i>Axe "connecté"</i></p> <p>3 axes : Les mouvements des trois axes d'un seul des deux bras du bébé déclenchent la stimulation audiovisuelle - Toutes les études pilotes sauf I et J.</p> <p>1 axe : Les mouvements sur un seul axe (x) d'un seul des deux bras du bébé déclenchent la stimulation audiovisuelle - Études pilotes I et J.</p>
Paramètre spatial	<p>Distal : contingence entre les mouvements des bras du bébé et une stimulation audiovisuelle sur un écran situé en face du bébé à environ 60 cm, et des haut-parleurs de part et d'autre de l'écran - Études pilotes A à F.</p> <p>Proximal : contingence entre les mouvements des bras du bébé et une stimulation audiovisuelle sur des écrans situés de part et d'autre du bébé ou contingence entre les mouvements des bras du bébé et une stimulation audiovisuelle présentée directement sur les bracelets - Études pilotes G à L.</p>

Tableau 5.1 – Les quatre facteurs que nous avons modifiés au cours des douze études pilotes et les variations employées.

2.5.2 Grille de cotation : mouvements, regard et appréciation subjective

Les scores de détection et de différenciation ont été déterminés pour chaque bébé à partir de deux réponses comportementales : les mouvements d'une part et la direction du regard d'autre part. Nous avons choisi ces deux réponses comportementales car celles-ci ont été fréquemment utilisées dans la littérature afin de déterminer la sensibilité des bébés à une contingence sensorimotrice et leur degré de différenciation de celle-ci (voir par ex. [Rovee-Collier et al., 1978](#); [Watanabe & Taga, 2006](#), pour les mouvements et [Wang et al., 2012](#); [Linde et al., 1985](#), pour le regard). L'observation des mouvements permet de déterminer en quelle mesure un bébé a détecté qu'une de ses actions déclenche la stimulation visuelle (détection de la contingence) et si oui, laquelle de ses actions (différenciation de la contingence). L'observation de la direction du regard du bébé donne une indication sur la capacité du bébé à anticiper l'apparition de la stimulation visuelle, après n'importe quelle action déclenchant la stimulation audiovisuelle (détection de la contingence) ou après un mouvement du bras « connecté » uniquement (différenciation de la contingence).

	Mouvement <i>détection et différenciation*</i>	Direction du regard <i>détection et différenciation*</i>
Score 0	Aucun mouvement déclenchant la stimulation audiovisuelle.	Aucun regard dirigé vers la source de stimulation (écrans ou bracelets).
Score 1	Mouvements déclenchant la stimulation audiovisuelle réalisés sans répétition, ni pause.	Les regards du bébé vers la source de stimulation (écrans ou bracelets) ne sont pas coordonnés avec l'apparition de la stimulation audiovisuelle.
Score 2	Répétition (2 x) du même mouvement déclenchant la stimulation audiovisuelle observée 3 fois au cours de la session.	Les regards du bébé vers la source de stimulation (écrans ou bracelets) sont réalisés juste après l'apparition de la stimulation audiovisuelle.
Score 3	Répétition (2 x) du même mouvement déclenchant la stimulation audiovisuelle, suivie d'un temps sans aucun mouvement puis à nouveau d'une répétition (2 x) de ce mouvement.	Les regards du bébé vers la source de stimulation (écrans ou bracelets) sont réalisés avant l'apparition de la stimulation audiovisuelle (au moins 2 x).

Tableau 5.2 – Critères d'attribution du score de mouvement (de 0 à 3) et du score de regard (de 0 à 3). Un score de mouvement et un score de regard sont attribués à chaque bébé pour la détection et la différenciation de la contingence (sauf pour les pilotes A et B où seul un score de détection a été attribué, les deux bras étant « connectés »).

* Les mêmes critères sont utilisés pour la détection et la différenciation, à la différence que pour la différenciation uniquement les explorations de la contingence impliquant un mouvement du bras « connecté » seul sont prises en compte dans le codage.

Un « score de mouvement » (noté M_{det} , allant de 0 à 3) et un « score de regard » (R_{det} de 0 à 3) pour la détection de la contingence ainsi qu'un « score de mouvement » (noté M_{dif} , allant de 0 à 3) et un « score de regard » (R_{dif} de 0 à 3) pour la différenciation de la contingence étaient attribués à chaque bébé — à noter que le score de différenciation n'a pas été attribué pour les études pilotes A (Section 3.1.1) et B (Section 3.1.2), où les bébés étaient exposés à une contingence impliquant comme action contingente les mouvements des deux bras (et non d'un seul bras). Nous avons utilisé les mêmes critères pour les scores de mouvement et de regard en détection et différenciation, à la différence qu'en différenciation uniquement les explorations de la contingence impliquant un mouvement du bras « connecté » seul étaient prises en compte lors du codage. Les critères d'attribution du score de mouvement et du score de regard sont précisés dans le Tableau 5.2.

2.5.3 Calcul des scores de détection et de différenciation

Pour chaque bébé, les scores de mouvement et de regard en détection (M_{det} et R_{det}) et en différenciation (M_{dif} et R_{dif}) ont été utilisés afin de calculer le score de détection ($Score_{det}$) et le score de différenciation ($Score_{dif}$), selon les formules suivantes :

$$Score_{det} = M_{det} \times 0.8 + R_{det} \times 0.2$$

$$Score_{dif} = M_{dif} \times 0.8 + R_{dif} \times 0.2$$

Nous avons donné un poids plus important au score de mouvement qu'au score de regard car le score de regard ne considère pas la réaction du bébé à l'aspect auditif de la stimulation audiovisuelle — par exemple, le score de regard ne permet pas de rendre compte d'une détection de la contingence avec anticipation de l'aspect auditif mais non de l'aspect visuel de la stimulation audiovisuelle. Un score d'appréciation subjective du codeur (allant de 0 à 3) a aussi été attribué à chaque bébé pour la détection (I_{det}) et pour la différenciation (I_{dif}) de la contingence. Le format du codage vidéo effectué pour chaque bébé est présenté dans le Tableau 5.3.

A noter que pour la suite des analyses, nous considérons qu'un score de détection supérieur ou égal à 2 ($Score_{det} \geq 2$) est le reflet d'une détection de la contingence et qu'un score de différenciation supérieur ou égal à 2 ($Score_{dif} \geq 2$) est le reflet d'une différenciation de la contingence. Nous avons choisi le seuil de 2 car cela assurait que les bébés aient obtenus des scores de mouvement (M_{dt} et M_{dif}) et de regard (R_{det} et R_{dif}) supérieurs ou égaux à 2, reflets d'une détection/différenciation de la contingence (voir Tableau 5.3).

	Score Mouvement	Score Regard	Score Total	Score Subjectif
Détection : toutes les situations d'exposition à la contingence	$M_{\text{dét}}$ [0 ; 3]	$R_{\text{dét}}$ [0 ; 3]	$\text{Score}_{\text{dét}} = M_{\text{dét}} * 0.8 + R_{\text{dét}} * 0.2$	$I_{\text{dét}}$ [0 ; 3]
Différenciation : uniquement les situations d'exposition à la contingence impliquant un mouvement du bras "connecté" seul	M_{dif} [0 ; 3]	R_{dif} [0 ; 3]	$\text{Score}_{\text{dif}} = M_{\text{dif}} * 0.8 + R_{\text{dif}} * 0.2$	I_{dif} [0 ; 3]

Tableau 5.3 – Format du codage vidéo effectué pour chaque bébé.

2.5.4 Vérification du codage vidéo

Ce codage vidéo a été réalisé par l'auteure de cette thèse pour 98 des 131 bébés testés (voir Section 2.1 pour les critères d'exclusion). Le codage vidéo a été réalisé par un second codeur indépendant pour 45 des 98 des bébés inclus dans les analyses (46%). Parmi les 45 bébés double-codés, 30 bébés ont été choisis de manière aléatoire et 15 bébés ont été sélectionnés car le codeur principal avait eu des difficultés lors du codage. Un pourcentage d'accord entre les deux codeurs a été calculé selon la formule suivante :

$$1 - \frac{\text{valeur absolue de la différence entre les codeurs}}{\text{codage principal}}$$

Le pourcentage moyen d'accord obtenu entre les codeurs est de 95%. Pour la suite des analyses, nous avons conservé le score le plus bas lorsque les deux codages différaient. Nous avons ensuite comparé pour tous les bébés le score de détection ($Score_{\text{det}}$) et le score d'appréciation subjective de détection (I_{det}), ainsi que le score de différenciation ($Score_{\text{dif}}$) et le score d'appréciation subjective de différenciation (I_{dif}) afin de vérifier que les scores obtenus à partir de la grille de cotation ($Score_{\text{det}}$ et $Score_{\text{dif}}$) rendaient bien compte des impressions subjectives du codeur (I_{det} et I_{dif}). Nous n'avons pas obtenu de différence significative entre les scores et cela aussi bien pour la détection de la contingence (*paired two-tailed t-test* : $t(142) < -.001, p = 1$) que pour la différenciation de la contingence (*paired two-tailed t-test* : $t(123) = -.543, p = .588$). Par la suite, seuls le score de détection ($Score_{\text{det}}$) et le score de différenciation ($Score_{\text{dif}}$) ont été utilisés dans les analyses.

3 Mise en place d'un nouveau protocole expérimental

Cette section présente les douze études pilotes ayant été nécessaires à la mise en place d'un nouveau protocole expérimental. Nous détaillons pour chaque étude le protocole utilisé et les résultats obtenus.

Durant cette série d'études pilotes, nous avons manipulé quatre facteurs que nous avons identifiés comme pouvant influencer la sensibilité aux contingences sensorimotrices chez le bébé (Chapitre 1). Pour rappel, ces facteurs étaient : les conditions d'exposition, le nombre de sessions d'exposition, la saillance de l'action contingente et le paramètre spatial de la contingence. Le Tableau 5.4 présente les variations de ces facteurs utilisées au sein de chaque étude. L'influence de l'âge et de ces quatre facteurs sur la sensibilité aux contingences sensorimotrices chez le bébé est analysée dans la section suivante (Section 4).

Pilote	Conditions d'exposition	Nombre de sessions	Saillance de l'action			Paramètre spatial
			Seuil	Bras	Axe	
A	Laboratoire	Une	Fixe	2 bras	3 axes	Distal
B*	Laboratoire	Une	Fixe	2 bras	3 axes	Distal
C	Laboratoire	Une	Fixe	1 bras	3 axes	Distal
D	Laboratoire	Une	Adaptatif	Variable	3 axes	Distal
E	Domicile	Plusieurs	Fixe	1 bras	3 axes	Distal
F	Domicile	Plusieurs	Adaptatif	Variable	3 axes	Distal
G	Laboratoire	Une	Fixe	1 bras	3 axes	Proximal
H	Laboratoire	Une	Fixe	1 bras	3 axes	Proximal
I	Laboratoire	Une	Fixe	1 bras	1 axe	Proximal
J	Laboratoire	Une	Adaptatif	1 bras	1 axe	Proximal
K	Laboratoire	Une	Fixe	1 bras	3 axes	Proximal
L	Laboratoire	Une	Fixe	1 bras	3 axes	Proximal

Tableau 5.4 – Variations au sein de chaque étude pilote des quatre facteurs identifiés comme influençant la sensibilité aux contingences sensorimotrices chez le bébé.

* Un groupe contrôle a été réalisé pour l'étude B, nommé Bc ci-après.

Les résultats de chaque étude sont présentés sous la forme du pourcentage de bébés montrant un score de détection supérieur ou égal à 2 ($Score_{det} \geq 2$) et quand cela est applicable du pourcentage de bébés montrant un score de différenciation supérieur ou égal à 2 ($Score_{dif} \geq 2$). Une vue d'ensemble de ces résultats est présentée en Figure 5.2. A noter que nous avons pris en compte uniquement le meilleur score des bébés rencontrés sur plusieurs jours à domicile (études pilotes E et F), cela afin de rendre compte des performances pouvant être atteintes grâce à un entraînement réparti en plusieurs sessions.

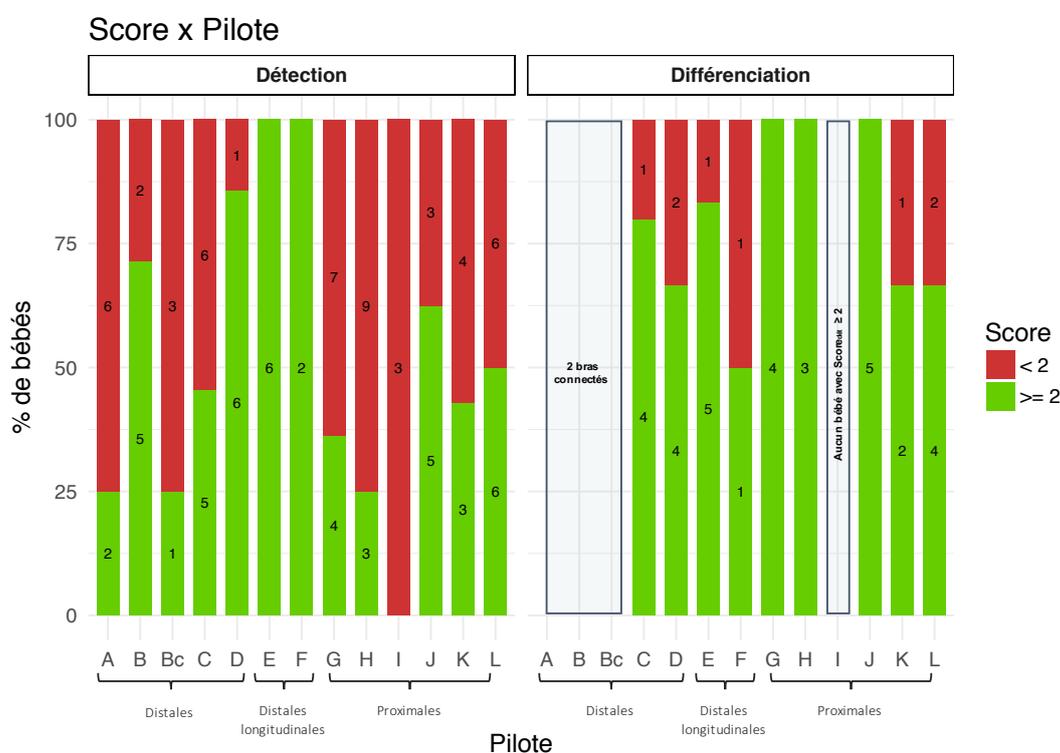


Figure 5.2 – Vue d'ensemble des résultats de chaque étude pilote. Détection - en vert : bébés ayant atteint un score de détection supérieur ou égal à 2 ($Score_{det} \geq 2$) - en rouge : bébés ayant un score de détection inférieur 2 ($Score_{det} < 2$). Différenciation (bébés avec $Score_{det} \geq 2$ uniquement) - en vert : bébés ayant atteint un score de différenciation supérieur ou égal à 2 ($Score_{dif} \geq 2$) - en rouge : bébés ayant un score de différenciation inférieur 2 ($Score_{dif} < 2$). A noter que nous avons pris en compte uniquement le meilleur score des bébés des Pilotes E et F (suivi longitudinal).

3.1 Contingences distales : études transversales menées au laboratoire

3.1.1 Étude pilote A — *Peek-a-boo* : visage et parole (2 bras)

Participants. Cette étude a été menée sur 10 bébés dont 8 inclus dans les analyses (vidéos manquantes pour 2 bébés) : 4 bébés de 3 mois (moyenne = 103 jours, intervalle = 103 jours), 1 bébé de 4 mois (110 jours), 2 bébés de 6 mois (moyenne = 189 jours, intervalle = 183 - 195 jours) et 1 bébé de 7 mois (199 jours).

Procédure. L'objectif de cette première étude pilote était de mimer une situation contingente proche de la vie quotidienne du bébé. Nous avons pour cela créé une version numérique du jeu du « coucou bébé » (*Peek-a-boo*) : l'image d'un visage de femme souriant est cachée dans une boîte située en bas au centre de l'écran. Dès que le bébé réalise un mouvement contingent, l'image du visage de femme sort de la boîte (déplacement du bas vers le centre de l'écran), reste affichée au centre de l'écran et rentre dans la boîte (déplacement du centre vers le bas de l'écran). La sortie de l'image hors de la boîte est accompagnée de parole adressée aux bébés (*infant-directed speech*) (9 sons différents dont par ex. « Bébé ! »). La stimulation visuelle est présentée durant les 3 secondes suivant l'exécution du mouvement contingent (1 seconde de sortie de la boîte, 1 seconde d'affichage fixe au centre de l'écran et 1 seconde de retour dans la boîte) et la stimulation auditive est présentée durant les 300 à 900 millisecondes (en fonction du son) suivant l'exécution du mouvement contingent. De plus, afin de maximiser l'exposition du bébé à la contingence, nous avons décidé que les mouvements des deux bras du bébé déclenchent la stimulation audiovisuelle (les deux bras sont « connectés ») avec un seuil d'activation propre à chaque bébé. Ce seuil d'activation est calculé à partir d'une phase de niveau de base de 30 secondes précédant l'expérience, durant laquelle le bébé était assis sur les genoux de l'un de ses parents face à l'écran où seule la boîte était présente. Le seuil d'activation correspond à 3 fois la moyenne d'activité des deux bras durant la phase de niveau de base. Au cours de la réalisation de cette première étude, nous avons modifié : le visage de femme utilisé pour la stimulation visuelle, le volume de la stimulation auditive, la vitesse d'apparition de la stimulation visuelle et la méthode de calcul du seuil. Les différentes variations de ce protocole ont été réunies lors des analyses.

Résultats et conclusion. Selon le codage vidéo, 2 bébés sur 8 (25%) présentent un score de détection supérieur ou égal à 2 ($Score_{det} \geq 2$). Ce protocole ne semble donc pas adéquat. Nous avons aussi noté que plusieurs bébés semblaient effrayés par la situation, ou du moins, pleuraient rapidement (durée moyenne de l'expérience = 3 min 50 sec), ce qui pourrait s'expliquer par l'utilisation de l'image (et non d'une vidéo) d'un visage associée à de la parole.

3.1.2 Étude pilote B — *Peek-a-boo* : clowns et mélodie (2 bras)

Participants. 26 bébés ont été testés pour cette étude pilote, répartis en deux groupes, un groupe expérimental et un groupe contrôle. Le groupe expérimental était composé de 11 bébés dont 7 inclus dans les analyses (vidéo manquante pour 1 bébé, problèmes expérimentaux pour 1 bébé et pleurs pour 2 bébés) : 3 bébés de 6 mois (moyenne = 182 jours, intervalle = 177 - 187 jours), 3 bébés de 7 mois (moyenne = 209 jours, intervalle = 206 - 210 jours) et 1 bébé de 8 mois (230 jours). Le groupe contrôle était composé de 15 bébés dont 4 bébés inclus dans les analyses (vidéos manquantes pour 6 bébés et pleurs pour 5 bébés) : 2 bébés de 7 mois (moyenne = 221 jours, intervalle = 215 - 228 jours), 1 bébé de 8 mois (245 jours) et 1 bébé de 9 mois (259 jours).

Procédure. Nous avons décidé d'utiliser la même contingence que celle de l'étude pilote A (Section 3.1.1 : boîte affichée en bas au centre de l'écran avec apparition d'un stimulus sortant de la boîte après chaque mouvement du bébé) mais en adaptant la stimulation audiovisuelle pour que celle-ci soit moins étrange. Pour cela nous avons repris la stimulation visuelle utilisée dans l'expérience présentée au Chapitre 4 (clown) et nous l'avons déclinée en 10 coloris différents. Nous avons utilisé comme stimulation auditive un ensemble de 10 sons mélodiques. Ainsi, chaque stimulation audiovisuelle correspondait à la combinaison entre une stimulation visuelle et une stimulation auditive, parmi 100 combinaisons possibles. Nous avons choisi d'utiliser plusieurs stimulations audiovisuelles afin de ne pas être confronté à un phénomène d'habituation et à une perte d'intérêt des bébés pour la stimulation (voir par ex. Colombo & Mitchell, 2009, pour une revue sur l'habituation visuelle). La stimulation visuelle était présentée durant les 3.5 secondes (1 seconde de sortie de la boîte, 1.5 secondes d'affichage fixe et 1 seconde de retour dans la boîte) suivant l'exécution du mouvement contingent et la stimulation auditive était présentée durant les 300 millisecondes à 2 secondes (en fonction du son) suivant l'exécution du mouvement contingent. Nous avons conservé le fait que les deux bras du bébé soient « connectés » avec un seuil d'apparition propre à chaque bébé calculé à partir d'une phase de niveau de base de 30 secondes précédant l'étude. Le seuil d'activation correspondait pour cette étude au maximum d'activité (parmi l'activité des deux bras) durant la phase de niveau de base + $1.5 \times$ la déviation standard de cette activité. Au cours de la réalisation de cette deuxième étude pilote, nous avons modifié : la vitesse d'apparition de la stimulation visuelle et la volume de la stimulation auditive. Les différentes variations de ce protocole ont été réunies lors des analyses.

Afin de vérifier que les comportements observés chez les bébés dans cette étude étaient bien causés par l'exposition à la contingence, nous avons réalisé un groupe contrôle pour lequel les bébés étaient exposés à une stimulation audiovisuelle similaire à celle des bébés du groupe expérimental, mais de manière non-contingente. Plus précisément, chaque bébé « contrôle » a été exposé à la stimulation audiovisuelle créée par un bébé du groupe expérimental (« *yoked control* »).

Résultats et conclusion. Selon le codage vidéo, 5 bébés sur 7 (71%) présentent un score de détection supérieur ou égal à 2 ($Score_{det} \geq 2$) dans le groupe expérimental. Dans le groupe contrôle, 1 bébé sur 4 (25%) présente un score de détection supérieur ou égal à 2 ($Score_{det} \geq 2$). Ce protocole expérimental semble donc plus adéquat que les protocoles utilisés dans le [Chapitre 4](#) et dans le Pilote A ([Section 3.1.1](#)). Cependant, ce protocole ne permet pas de mesurer la capacité des bébés à affiner la contingence à un seul membre et ne permet donc pas d'étudier le développement du savoir-faire corporel.

3.1.3 Étude pilote C — *Peek-a-boo* : clowns et mélodie (1 bras)

Participants. Cette étude a été menée sur 15 bébés, dont 11 inclus dans les analyses (problèmes expérimentaux pour 4 bébés) : 1 bébé de 5 mois (167 jours), 3 bébés de 6 mois (moyenne = 179 jours, intervalle = 174 - 188 jours), 2 bébés de 7 mois (moyenne = 205 jours, intervalle = 203 - 208 jours) et 5 bébés de 8 mois (moyenne = 248 jours, intervalle = 244 - 254 jours).

Procédure. Cette troisième étude pilote avait pour objectif d'adapter le protocole du Pilote B ([Section 3.1.2](#)) à l'étude du développement du savoir-faire corporel (voir [Chapitre 4](#)). Pour cela, nous avons développé une contingence pour laquelle seulement un des deux bras du bébé était « connecté ». Le reste du protocole était similaire à celui décrit au Pilote B (voir [Section 3.1.2](#)), mise à part que nous avons utilisé 8 sons différents au lieu de 10 (ce qui équivalait à 80 stimulations audiovisuelles différentes), les 2 sons supprimés nous ayant semblé effrayer les bébés.

Résultats et conclusion. Selon le codage vidéo, 5 bébés sur 11 (45%) présentent un score de détection supérieur ou égale à 2 ($Score_{det} \geq 2$) et parmi ces 5 bébés, 4 bébés (80%) présentent un score de différenciation supérieur ou égal à 2 ($Score_{dif} \geq 2$). Les résultats en détection suggèrent que ce protocole est moins adapté que le protocole du Pilote B ([Section 3.1.2](#)), ce qui suppose que de restreindre l'action contingente à un seul bras diminue la capacité des bébés à détecter cette contingence.

3.1.4 Étude pilote D — *Peek-a-boo* : clowns et mélodie (*shaping*)

Participants. Cette étude a été menée sur 10 bébés, dont 7 inclus dans les analyses (vidéo manquante pour 1 bébé et problèmes expérimentaux pour 2 bébés) : 1 bébé de 3 mois (103 jours) et 6 bébés de 6 mois (moyenne = 175 jours, intervalle = 169 - 180 jours).

Procédure. La logique ayant menée à la création du pilote D correspond à la combinaison de trois contraintes :

- (1) La comparaison des résultats des études pilotes B (Section 3.1.2) et C (Section 3.1.3) suggèrent que les bébés sont meilleurs pour détecter une contingence lorsque les deux bras sont « connectés ». Une explication à ce constat serait que les bébés ont plus de facilité à détecter une contingence lorsqu'ils peuvent facilement découvrir celle-ci par hasard. En effet, lorsque les deux bras sont « connectés », la probabilité que le bébé fasse par hasard un mouvement lui permettant de déclencher la stimulation contingente est plus élevée que lorsqu'un seul bras est « connecté ». Il apparaît donc nécessaire de faire en sorte que, au début de l'exploration de la contingence du moins, les deux bras du bébé soient « connectés ». Une seconde méthode pouvant être aussi envisagée pour augmenter la probabilité de découverte de la contingence est d'utiliser (toujours au départ du moins) un seuil d'activation bas, permettant que des petits mouvements du bébé déclenchent la stimulation.
- (2) L'étude du savoir-faire corporel nécessite un protocole dans lequel un seul des bras du bébé est « connecté » (à un moment du moins), afin de mesurer la capacité des bébés à utiliser leurs bras de manière différenciée.
- (3) La grille de cotation présentée ci-dessus (Tableau 5.2) suppose que, lorsqu'il a détecté la contingence, le bébé réalise des mouvements stéréotypés et répétés avec des pauses entre les répétitions et non des petits mouvements en continu. Il semble nécessaire, afin que les bébés adoptent ce comportement dans leur exploration de la contingence, de contraindre la tâche de sorte à ce que le bébé ait besoin d'adopter ce comportement pour explorer la contingence. Une solution est alors que le seuil d'activation soit assez élevé pour que seuls des mouvements clairs, c'est-à-dire avec une accélération élevée, déclenchent la stimulation contingente.

Afin de combiner ces trois contraintes, nous avons conçu pour cette étude une contingence « adaptative ». Au départ, les deux bras du bébé sont « connectés » et le seuil est bas ($x = 0.33$). Cette borne a été fixée à partir des données récoltées durant les études précédentes et correspond à la médiane de l'activité maximum (parmi les 2 bras) de tous les bébés + $1.5 \times$ la déviation standard. Puis, au cours de l'expérience, l'expérimentateur contraint la contingence à un seul bras et augmente progressivement le seuil (en le diminuant parfois à nouveau pour faciliter la découverte de la contingence dans le cas où l'expérimentateur considère que le bébé n'a pas encore détecté la contingence). Nous n'avons pas réalisé de phase de niveau de base pour cette étude, l'utilisation d'un seuil adaptatif ne nécessitant pas le calcul d'un seuil propre à chaque bébé.

Résultats et conclusion. 6 bébés sur 7 (86%) présentent un score de détection supérieur ou égal à 2 ($Score_{det} \geq 2$) et parmi ces 6 bébés, 4 bébés (67%) présentent un score de différenciation supérieur ou égal à 2 ($Score_{dif} \geq 2$). Ce protocole expérimental semble donc être adapté. Cependant l'utilisation d'un seuil adaptatif subjectif (car déterminé par l'expérimentateur) et variant d'un bébé à l'autre présente des biais méthodologiques importants : comment comparer au cours du temps l'activité motrice de plusieurs bébés n'ayant pas été exposés aux mêmes variations du seuil ? Si un bébé n'a pas détecté/affiné la contingence, est-ce propre au bébé ou à une variation du seuil ratée de la part de l'expérimentateur ?

3.2 Contingences distales : études longitudinales menées à domicile

3.2.1 Étude pilote E — *Peek-a-boo* : clowns et mélodie (1 bras) - longitudinal à domicile

Participants. Cette étude a été menée sur 6 bébés, tous inclus dans les analyses : 5 bébés de 4 mois (moyenne = 131 jours, intervalle = 125 - 134 jours au premier jour de l'étude) et 1 bébé de 5 mois (138 jours au premier jour de l'étude).

Procédure. Cette pilote était une variation du Pilote C (Section 3.1.3) mais réalisée sur plusieurs jours et à domicile. Cette seconde version du Pilote C (Section 3.1.3) avait pour objectif de tester l'hypothèse suivante : la détection d'une contingence est facilitée par un apprentissage réparti en des sessions étalées sur plusieurs jours (voir Chapitre 1 et Chapitre 2). Afin de mettre en place un tel dispositif, nous avons décidé de mener cette étude à domicile, ce qui nous a permis d'explorer une seconde hypothèse : la détection d'une contingence est facilitée par une exposition à celle-ci dans un environnement connu par le bébé, comme cela est par exemple suggéré par les meilleurs résultats observés à domicile qu'au laboratoire dans Rovee-Collier et al. (1978). Nous observerons dans les analyses (Section 4) les effets du facteur « conditions d'exposition » et du facteur « nombre de sessions d'apprentissage » de façon séparée. Les bébés ont été suivis à leur domicile durant 5 jours (voir Tableau 5.5). Durant les trois premiers jours, le bébé est testé avec le même protocole que celui décrit dans le Pilote C (Section 3.1.3). Le seuil d'activation est calculé pour chaque bébé pendant une période de niveau de base de 30 secondes (seule la boîte est affichée à l'écran) réalisée le premier jour, puis le seuil est fixe pour chaque bébé durant les trois jours d'entraînement. Le seuil correspond au maximum d'activité (parmi l'activité des deux bras) durant la phase de niveau de base + $1.5 \times$ la déviation standard de cette activité. Ce seuil est borné entre 0.33 et 0.61. Ces bornes ont été déterminées à partir des données d'activité moyenne enregistrée durant les études pilotes précédentes, afin que le seuil ne soit ni trop élevé ni trop faible, ce que nous avons parfois noté durant les pilotes précédents. Ces bornes correspondent à la médiane de l'activité maximum (parmi les 2 bras) de tous les bébés + $1.5 \times$ la déviation standard (0.33) et + $3 \times$ la

déviations standard (0.61). Le quatrième jour, le bébé est exposé à la contingence décrite dans le [Chapitre 4](#), afin de mesurer la capacité de généralisation d'une contingence à une autre. Le cinquième jour, le bébé est testé avec le même protocole que les trois premiers jours, mais le bras « connecté » est inversé afin de mesurer la capacité du bébé à transférer une contingence d'un bras à l'autre. A noter que pour le premier bébé que nous avons testé avec ce protocole (Bébé n°1), le bras « connecté » a été inversé à chaque jour sans changement de contingence au Jour 3. Nous souhaitons par ce changement de bras entre chaque jour pouvoir étudier le transfert de la contingence d'un bras à l'autre, mais nous avons noté que le bébé semblait perturbé dans son apprentissage par le changement de bras journalier ; nous avons alors préféré adopter une version avec trois jours d'apprentissage consécutifs sans changement de bras suivi d'un changement de bras au Jour 5 pour les autres bébés testés dans cette étude (pour rappel, au Jour 4 un changement de contingence était administré). Pour un autre bébé (Bébé n°5), le jour 5 était similaire aux jours 1, 2 et 3 (pas de changement du bras « connecté »), dû à une erreur expérimentale. Enfin, pour un dernier bébé (Bébé n°6), le dernier jour (changement de bras « connecté ») n'a pas été administré, les parents n'étant pas disponibles ce jour-là.

Bébé	Jour 1	Jour 2	Jour 3	Jour 4	Jour 5
n°1	DC // D	GC // D	DC // D	GC // D	-
n°2	DC // D	Pas de vidéo	DC // D	DC // A	GC // D
n°3	GC // D	GC // D	GC // D	GC // A	DC // D
n°4	GC // D	DC // D	GC // D	GC // A	DC // D
n°5	DC // D	DC // D	DC // D	DC // A	DC // D
n°6	GC // D	Pas de vidéo	GC // D	GC // A	-

Tableau 5.5 – Programme d'entraînement suivi par chaque bébé. Les lettres en gras indique un changement par rapport au Jour 1 (sauf pour le Bébé n°1 où cela indique un changement par rapport au Jour 2, que nous avons choisi comme référence car ce bébé montrait un apprentissage à partir du Jour 2 uniquement et avait subi un changement de bras « connecté » entre le Jour 1 et 2).

Légende — DC : bras droit « connecté », GC : bras gauche « connecté », D : contingence digitale et A : contingence analogique

Résultats et conclusion. Selon le codage vidéo, 6 bébés sur 6 (100%) ont atteint un score de détection supérieur et égal à 2 ($Score_{det} \geq 2$) et 5 bébés de ces 6 bébés (83%) ont atteint un score de différenciation supérieur ou égal à 2 ($Score_{dif} \geq 2$). Ce protocole expérimental semble donc très adapté, mais s'avère cependant trop coûteux en temps et en énergie pour être adopté en tant que socle de futurs travaux.

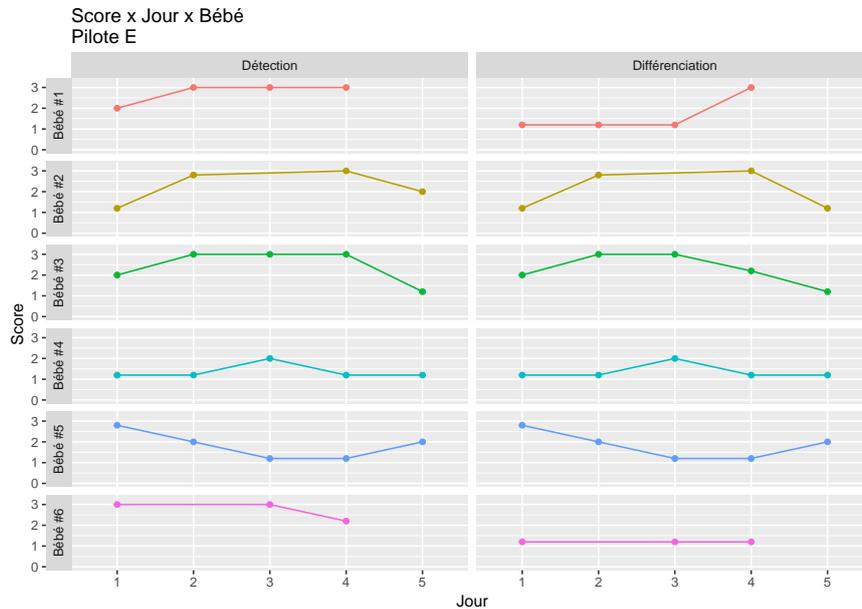


Figure 5.3 – Données individuelles des bébés rencontrés pour l'étude pilote E. Représentation du score de détection et du score de différenciation en fonction du jour pour chaque bébé. Jour 1 à 3 : entraînement, Jour 4 : généralisation (sauf Bébé 1), Jour 5 : transfert (sauf Bébé 1 et 5).

Nous présentons maintenant le détail des données individuelles (voir Figure 5.3), afin d'examiner l'évolution de l'apprentissage des bébés au fur et à mesure des sessions — à noter que nous n'analysons pas les résultats correspondant à un changement de bras « connecté » ou à un changement de contingence (ceux-ci seront analysés en Section 4.2). Concernant la détection, il apparaît que seulement la moitié des bébés s'améliorent entre la première session et les sessions suivantes (Bébés : n°1, n°2, n°3, n°4), les autres bébés présentant une diminution de leurs résultats (Bébés : n°5, n°6). Concernant la différenciation, 4 bébés s'améliorent entre la première session et les sessions suivantes (les quatre mêmes bébés que pour la détection : Bébés : n°1, n°2, n°3, n°4), 1 bébé ne présente pas d'évolution (Bébé n°6) et 1 bébé présente une baisse dans ses résultats (Bébé n°5). Ainsi, à première vue, aucune tendance claire ne semble transparaître de l'examen des données individuelles. Une analyse plus fine est alors nécessaire. Nous observons en effet que, concernant la détection, les 2 bébés n'ayant pas montré d'apprentissage au cours des sessions avaient en fait déjà détecté la contingence lors de la première session ($Score_{det} \geq 2$). Ce manque d'apprentissage peut donc s'expliquer par une perte d'intérêt pour la tâche. Concernant la différenciation, les 2 bébés ne montrant pas d'apprentissage au cours des sessions présentent des résultats divergents. En effet, pour le Bébé n°5 nous retrouvons le pattern décrit pour la détection : le bébé avait déjà différencié la contingence lors de la première session ($Score_{dif} \geq 2$) et présente lors des sessions suivantes une baisse de ses résultats qui pourrait s'expliquer par une perte d'intérêt pour la tâche. Nous observons un pattern d'apprentissage différent pour le Bébé n°6 : ce bébé n'avait pas dif-

férencié la contingence lors de la première session ($Score_{dif} < 2$) mais ne montre pas pour autant d'évolution dans ses résultats, ce qui pourrait indiquer une incapacité de ce bébé à différencier le membre « connecté » et cela malgré plusieurs sessions d'exposition à la contingence.

3.2.2 Étude pilote F — *Peek-a-boo* : clowns et mélodie (*shaping*) - longitudinal à domicile

Participants. Cette étude a été menée sur 2 bébés de 5 mois (moyenne = 141 jours, intervalle = 141 - 142 jours au premier jour de l'étude), tous les deux inclus dans les analyses.

Procédure. Cette étude pilote était une variation du Pilote D (Section 3.1.4) mais réalisée sur plusieurs jours et à domicile. Similairement au précédent pilote réalisé de manière longitudinale (Pilote E, Section 3.2.1), l'objectif de ce pilote était de tester l'hypothèse selon laquelle la détection et la différenciation d'une contingence est facilitée par un apprentissage réparti en sessions étalées sur plusieurs jours. Les bébés ont été rencontrés durant 3 jours consécutifs (voir Tableau 5.6). Nous n'avons pas réalisé de phase de niveau de base pour cette étude, l'utilisation d'un seuil adaptatif ne nécessitant pas le calcul d'un seuil propre à chaque bébé. Le bras « connecté » est changé entre le premier et le second jour, puis conservé entre le second et le troisième jour. Ce design avait pour but de mesurer la capacité de transfert d'un bras à l'autre du bébé, en leur donnant la possibilité de réaliser ce transfert sur deux sessions d'apprentissage (voir par ex. Timmons, 1994).

Bébé	Jour 1	Jour 2	Jour 3
n°1	DC	GC	GC
n°2	DC	GC	GC

Tableau 5.6 – Programme d'entraînement suivi par chaque bébé. Les lettres en gras indique un changement par rapport au Jour 1.

Légende — DC : bras droit « connecté » et GC : bras gauche « connecté »

Résultats et conclusion. Selon le codage vidéo, 2 bébés sur 2 (100%) présentent un score de détection supérieur ou égal à 2 ($Score_{det} \geq 2$) et 1 bébé de ces 2 bébés (50%) présente un score de différenciation supérieur ou égal à 2 ($Score_{dif} \geq 2$). Ce protocole expérimental semble donc adapté mais, de la même manière que le pilote D (Section 3.1.4), est trop coûteux en temps et en énergie. De plus, la variation du seuil au cours de l'expérience s'est avérée être compliquée à mettre en place à domicile : il était en effet nécessaire pour le réaliser que l'expérimentateur appuie sur les touches du clavier de l'ordinateur portable sur lequel apparaissait la stimulation visuelle, ce qui ajoutait une dimension sociale non-désirée à l'étude.

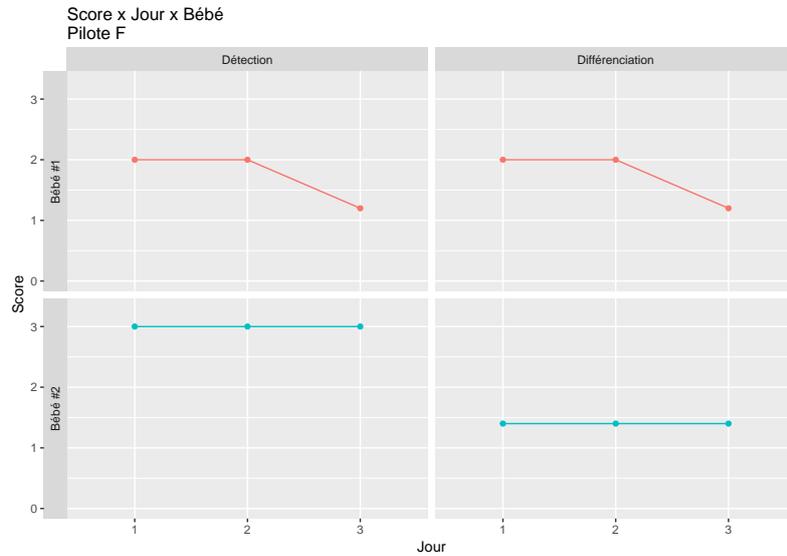


Figure 5.4 – Données individuelles des bébés rencontrés pour l'étude pilote F. Représentation du score de détection et du score de différenciation en fonction du jour pour chaque bébé. Jour 1 : entraînement, Jours 2 et 3 : transfert.

Nous effectuons ici une analyse des données individuelles pour observer les effets d'apprentissage au cours de l'entraînement (voir Figure 5.4). Les mêmes patterns sont observés en détection et en différenciation : aucun bébé ne s'améliore entre la première session et les sessions suivantes, le Bébé n°1 présentant une diminution de ses résultats et le Bébé n°2 ne présentant pas d'évolution. Pour le Bébé n°1 il apparaît que celui-ci avait détecté et différencié la contingence dès la première session, la diminution de ses résultats peut s'expliquer par une perte d'intérêt pour la tâche. Pour le bébé n°2, l'absence d'évolution en détection semble s'expliquer par un effet plafond (score de 3 dès la première session), mais l'absence d'évolution en différenciation semble traduire une incapacité du bébé à affiner la contingence au membre « connecté ».

3.3 Contingences proximales : études transversales menées au laboratoire

Au sein des protocoles présentés ci-après (G à L), les bébés ont été exposés à des contingences proximales. Nous avons entrepris ce changement afin de tester l'hypothèse selon laquelle les bébés à l'âge de l'acquisition la prise manuelle (à partir de l'âge de 3 mois) présentent une préférence pour l'exploration de contingences proximales plutôt que de contingences distales, ce qui pourrait s'expliquer par leur motivation intrinsèque à se concentrer sur les interactions avec l'environnement leur permettant de renforcer leurs habiletés manuelles. Cette hypothèse n'a à notre connaissance jamais été testée dans la littérature.

3.3.1 Étude pilote G — bracelets lumineux (contingence mécanique)

Participants. Cette étude a été menée sur 16 bébés, dont 11 inclus dans les analyses (vidéos manquantes pour 4 bébés et problèmes expérimentaux pour 1 bébé) : 2 bébés de 4 mois (moyenne = 137 jours, intervalle = 137 jours), 4 bébés de 5 mois (moyenne = 157 jours, intervalle = 138 - 167 jours) et 5 bébés de 6 mois (moyenne = 172 jours, intervalle = 168 - 177 jours).

Procédure. Le but de cette étude pilote était d'exposer les bébés à une contingence parfaitement co-localisée entre les mouvements d'un de leur bras et une stimulation audiovisuelle. Nous avons pour cela conçu des « bracelets lumineux », dont la lumière (accompagnée d'un son) se déclenche lorsque le bébé réalise des mouvements brusques du bras « connecté ». Le dispositif mécanique utilisé consistait en une boîte transparente ronde de 3.5 cm de diamètre attachée à une bande scratch pouvant être enroulée autour du poignet du bébé (voir Figure 5.1d pour une illustration) La boîte contenait une diode électroluminescente multicolore reliée à une pile et à un condensateur, ce qui permettait par un système de ressort qu'une lumière clignotante rouge et bleue se déclenche durant 13 secondes lorsque le ressort entrainé en contact avec les parois de son socle, contact ayant lieu lorsque le bébé réalisait des mouvements brusques du bras « connecté ». La stimulation auditive était causée par le choc d'un écrou contenu dans la boîte contre les parois de celle-ci et se déclenchait ainsi à chaque mouvement brusque du bras « connecté ». De ce fait, ce protocole présentait une divergence entre la contingence visuelle et la contingence auditive, la stimulation visuelle étant continue pour une durée de 13 secondes après un mouvement contingent, alors que la stimulation auditive se produisait après chaque mouvement contingent pour une durée d'environ 100 millisecondes. Ainsi, lorsque le bébé effectuait des mouvements contingents alors que la stimulation visuelle était déjà « lancée », cela n'avait pas d'effet sur la stimulation visuelle, mais déclenchait à nouveau la stimulation auditive. Concernant le bras « non-connecté », le bébé y portait un bracelet à l'aspect et au poids similaire à celui porté au bras « connecté », mais ne produisant ni lumière ni son. Le protocole utilisé ici posait un problème de disparité attentionnelle et sensorielle entre le côté de l'espace dans lequel se trouvait le bras « connecté » du bébé et le côté de l'espace dans lequel se trouvait le bras « non-connecté » du bébé (stimulation audiovisuelle saillante d'une part et rien de l'autre). Cependant, nous n'avons pas pu adapter le protocole de sorte à effacer cette disparité, les bracelets étant mécaniques, il était impossible de créer une stimulation audiovisuelle miroir au niveau du bras « non-connecté » du bébé. Nous n'avons pas réalisé de phase de niveau de base pour cette étude, le seuil (mécanique) étant par définition commun à tous les bébés.

Résultats et conclusion. Selon le codage vidéo, 4 bébés sur 11 (36%) présentent un score de détection supérieur ou égal à 2 ($Score_{det} \geq 2$) et parmi ces 4 bébés, tous les bébés (100%) présentent un score de différenciation supérieur ou égal à 2 ($Score_{dif} \geq 2$). Ce protocole expérimental ne semble donc pas adapté. Nous faisons l'hypothèse que la faible capacité montrée par les bébés à détecter/affiner cette contingence pourrait s'expliquer par la durée très longue (13 secondes) de la stimulation visuelle suite au mouvement contingent du bébé, cela ayant comme conséquences :

- Un même mouvement entraîne parfois l'apparition de la stimulation visuelle et parfois non: lorsque la stimulation visuelle est déjà « lancée » celle-ci ne peut pas être « relancée », ce qui fait que tous les mouvements correspondant au mouvement contingent mais ayant lieu lorsque la stimulation visuelle est déjà « lancée » ne déclenchent pas l'apparition de la stimulation visuelle.
- Dès lors que la stimulation visuelle est « lancée » depuis plusieurs secondes, le bébé doit faire le lien entre cette stimulation visuelle et une action réalisée il y a plusieurs secondes, alors même qu'il apparaît nécessaire que le délai entre l'action et le retour sensoriel soit inférieur à 3 secondes pour qu'une contingence puisse être détectée par un bébé (voir [Section 3.1.1](#) du [Chapitre 1](#)).

De plus, ce protocole n'aurait pas pu être utilisé comme base de futurs travaux, l'aspect mécanique de la contingence rendant impossible les variations que nous souhaitions étudier.

3.3.2 Étude pilote H — écrans proximaux

Participants. Cette étude a été menée sur 14 bébés, dont 12 inclus dans les analyses (vidéo manquante pour 1 bébé et problèmes expérimentaux pour 1 bébé) : 8 bébés de 5 mois (moyenne = 146 jours, intervalle = 138 - 150 jours), 2 bébés de 6 mois (moyenne = 182 jours, intervalle = 179 - 185 jours) et 2 bébés de 7 mois (moyenne = 207 jours, intervalle = 205 - 210 jours).

Procédure. Nous avons utilisé pour cette étude pilote une contingence entre les mouvements d'un bras du bébé et l'apparition d'une stimulation audiovisuelle sur un écran situé à proximité du bras « connecté » du bébé. Cependant, nous avons noté que cette première version du protocole provoquait, comme pour l'étude pilote précédente (Pilote G, [Section 3.3.1](#)), une forte disparité attentionnelle et sensorielle entre le côté de l'espace dans lequel se trouvait le bras « connecté » du bébé et le côté de l'espace dans lequel se trouvait le bras « non-connecté » du bébé (stimulation audiovisuelle saillante d'une part et écran noir de l'autre). Cette disparité attentionnelle et sensorielle rendait alors difficile l'interprétation des mouvements du bébé : le bébé bouge-t-il plus le bras « connecté » et regarde-t-il plus l'écran associé car il a détecté et affiné la contingence ou simplement car son attention exogène est attirée vers ce côté de l'espace ? Afin d'éliminer

cette difficulté d'interprétation, nous avons cette fois pu modifier le protocole de sorte à ce que les mouvements du bras « connecté » déclenchent des stimulations audiovisuelles identiques sur les écrans placés de chaque côté du bébé (aussi bien du « côté connecté » que du « côté non-connecté »). Ces deux variations du protocole ont été réunies lors des analyses. Pour ces deux variations du protocole, la stimulation visuelle consistait en un cercle coloré affiché au centre de l'écran variant entre deux couleurs (rouge/bleu ou orange/vert, avec un changement de couleur toutes les secondes) d'une durée de 20 millisecondes et dont l'intensité lumineuse était proportionnelle à l'accélération du bras « connecté ». La stimulation auditive consistait en un son d'une durée de 500 millisecondes. Nous avons utilisé cette stimulation audiovisuelle afin qu'elle soit le plus proche possible de celle utilisée pour l'étude pilote précédente (Pilote G, [Section 3.3.1](#)), afin de pouvoir plus facilement comparer les résultats de ces deux études. Nous avons utilisé un seuil adaptatif dans cette étude (voir Pilote D pour une description détaillée, [Section 3.1.4](#)) et nous n'avons donc pas réalisé de phase de niveau de base.

Résultats et conclusion. Selon le codage vidéo, 3 bébés sur 11 (27%) présentent un score de détection supérieur ou égal à 2 ($Score_{det} \geq 2$) et parmi ces 3 bébés, tous les bébés (100%) présentent un score de différenciation supérieur ou égal à 2 ($Score_{dif} \geq 2$). Ce protocole expérimental mettant en jeu une contingence proximale ne semble donc pas adapté. Cependant, il convient de noter que ce protocole n'implique pas une contingence parfaitement proximale, l'action et la stimulation audiovisuelle n'étant pas strictement co-localisées.

3.3.3 Étude pilote I — Micro:bit (1 axe, seuil fixe)

Participants. Cette étude a été menée sur 4 bébés, dont 3 bébés de 6 mois (moyenne = 182 jours, intervalle = 182 - 183 jours) inclus dans les analyses (problèmes expérimentaux pour 1 bébé).

Procédure. Cette étude pilote avait pour but de répondre aux faiblesses identifiées dans l'étude précédente ([Section 3.3.2](#) : une absence de co-localisation parfaite entre l'action et la stimulation audiovisuelle). Nous avons pour cela utilisé de nouveaux bracelet-accéléromètres de la marque Micro:bit communiquant par radio avec un programme Python contrôlant la contingence depuis un ordinateur. Les Micro:bit (voir [Figure 5.1e](#) pour une illustration) ont l'intérêt de posséder une grille de 25 diodes électroluminescentes (5×5 diodes électroluminescentes, 5×5 cm) pouvant être allumées sur commande, ainsi qu'un vibreur produisant des sons (dans notre cas entre 263Hz et 392 Hz) pouvant lui aussi être mis en marche sur commande. Nous avons ainsi pu créer une contingence entre l'accélération du bras « connecté » du bébé et une stimulation audiovisuelle apparaissant simultanément sur le bras « connecté » et sur le bras « non-connecté » du bébé afin de ne pas créer de disparité attentionnelle entre les deux bras du bébé. La stimulation audiovisuelle utilisée était un pattern lumineux rouge (combinaison d'une partie des 25 diodes électroluminescentes) et un son

joué pour une durée de 500 millisecondes après la réalisation du mouvement contingent. Dans une première version de cette étude, un seul pattern lumineux et un seul son étaient utilisés pour toutes les occurrences de la contingence. Puis, à nouveau afin d'éviter un phénomène d'habituation, nous avons créé 6 stimulations audiovisuelles différentes. De plus, nous avons décidé pour ce protocole de rendre l'action contingente la plus saillante possible, en limitant l'action contingente aux mouvements de bras du bébé réalisé sur un seul des axes de l'accéléromètre (l'axe x). Pour des raisons techniques, nous n'avons pas pu calculer un seuil propre à chaque bébé dans cette étude, celui-ci était donc fixe et commun à tous les bébés. Nous avons fixé ce seuil de manière à ce qu'il corresponde environ aux seuils observés dans les études précédentes. Nous n'avons ainsi pas eu besoin de réaliser de phase de niveau de base pour cette étude.

Résultats et conclusion. Selon le codage vidéo, aucun des 3 bébés (0%) n'a obtenu un score de détection ou de différenciation supérieur ou égal à 2 ($Score_{det} \geq 2$ ou $Score_{dif} \geq 2$). Ce protocole expérimental ne semble donc pas adapté. Nous supposons que ces mauvais résultats pourraient s'expliquer par l'utilisation d'un seuil fixe commun à chaque bébé ou à l'utilisation d'un seul axe « connecté ». Les deux études pilotes suivantes permettent d'explorer ces deux possibilités.

3.3.4 Étude pilote J — Micro:bit (1 axe, *shaping*)

Participants. Cette étude a été menée sur 8 bébés, dont 8 bébés inclus dans les analyses : 6 bébés de 6 mois (moyenne = 194 jours, intervalle = 199 - 197 jours) et 2 bébés de 7 mois (moyenne = 200 jours, intervalle = 199 - 201 jours).

Procédure. Cette étude pilote reprend le protocole du Pilote I (Section 3.3.3) en y ajoutant l'utilisation d'un seuil adaptatif, cela ayant donné des résultats positifs lors du Pilote D (Section 3.1.4). Ainsi, pour ce protocole, un bras du bébé était « connecté » avec une limitation des mouvements contingents à un seul des axes de l'accéléromètre (axe x). Le seuil d'activation était au départ bas, puis, au cours de l'expérience, était progressivement augmenté par l'expérimentateur (et parfois diminué à nouveau pour faciliter la découverte de la contingence). Nous n'avons pas réalisé de phase de niveau de base pour ce protocole, l'utilisation d'un seuil adaptatif ne le nécessitant pas.

Résultats et conclusion. Selon le codage vidéo, 5 bébés sur 8 (62.5%) présentent un score de détection supérieur ou égal à 2 ($Score_{det} \geq 2$) et parmi ces 5 bébés, tous les bébés (100%) présentent un score de différenciation supérieur ou égal à 2 ($Score_{dif} \geq 2$). Ce protocole expérimental présente les meilleurs résultats obtenus jusqu'ici avec l'utilisation d'une contingence proximale. Cependant, la restriction du mouvement contingent à un seul axe pose problème : l'axe étant déterminé par la position de l'accéléromètre et non par rapport à la position du bébé,

le mouvement déclenchant la stimulation audiovisuelle dépend de la position du bracelet sur le poignet du bébé, ce qui entraîne que le mouvement contingent varie d'un bébé à l'autre et au cours de l'expérience pour un même bébé. La variation d'un bébé à l'autre a pour conséquence de brouiller l'interprétation de potentielles différences interindividuelles. En effet, nous avons observé que les bébés réalisaient plus fréquemment des mouvements de bras de haut en bas, que de droite à gauche ou d'avant en arrière, ce qui suggère que la détection et la différenciation d'une contingence serait facilitée lorsque la position du bracelet sur le poignet du bébé est telle que l'axe « connecté » correspond à des mouvements de bras de bas en haut. Ainsi, des différences de positions du bracelet sur le poignet entre bébés pourraient influencer les différences de détection/différenciation observées entre deux conditions expérimentales ou deux groupes d'âge et cela sans que nous puissions utiliser cette variable comme facteur de nos analyses, la position du bracelet sur le poignet du bébé étant instable. Deuxièmement, la variation de position du bracelet sur le poignet du bébé et donc de mouvement contingent (haut-bas, droite-gauche ou avant-arrière) au cours de l'expérience pour un même bébé pourrait avoir pour conséquence d'augmenter la difficulté de détection/différenciation de la contingence. En effet, nous faisons l'hypothèse que les chances de réussite d'un apprentissage sont diminuées lorsque l'objet même de cet apprentissage varie au cours du temps. D'autre part, l'utilisation d'un seuil variable dont l'évolution au cours de l'expérience est décidée par l'expérimentateur est elle aussi problématique pour la comparaison des données interindividuelles (voir Pilote D pour un argumentaire détaillé, [Section 3.1.4](#)).

3.3.5 Étude pilote K — Micro:bit (3 axes, seuil fixe, niveau de base)

Participants. Cette étude a été menée sur 8 bébés, dont 7 bébés inclus dans les analyses (vidéo manquante pour 1 bébé) : 1 bébé de 6 mois (192 jours) et 6 bébés de 7 mois (moyenne = 204 jours, intervalle = 203 - 205 jours).

Procédure. Cette étude pilote reprend le protocole du Pilote J ([Section 3.3.4](#)) mais en ne contraignant pas le mouvement contingent à un seul axe. De plus, nous sommes revenus pour ce pilote à l'utilisation d'un seuil fixe afin de supprimer les problèmes causés par le seuil variable. Les problèmes techniques rencontrés précédemment (voir [Section 3.3.3](#)) étant résolus lors de la réalisation de ce pilote, nous avons pu calculer un seuil fixe propre à chaque bébé à partir d'une phase de niveau de base de 1 minute précédant l'étude. Le seuil d'activation correspond au maximum d'activité (parmi l'activité des deux bras) durant la phase de niveau de base + $1.5 \times$ la déviation standard de cette activité.

Résultats et conclusion. Selon le codage vidéo, 3 bébés sur 7 (43%) présentent un score de détection supérieur ou égal à 2 ($Score_{det} \geq 2$) et parmi ces 3 bébés, 2 bébés (67%) présentent un score de différenciation supérieur ou égal à 2 ($Score_{dif} \geq 2$). Ce protocole expérimental semble

donc plus adapté que celui utilisé dans le Pilote I (Section 3.3.3) pour lequel les mouvements contingents étaient contraints à un seul axe, mais moins adapté que celui du pilote J (Section 3.3.4) dans lequel le seuil était adaptatif.

3.3.6 Étude pilote L — Micro:bit (3 axes, *shaping* préprogrammé)

Participants. Cette étude a été menée sur 12 bébés tous inclus dans les analyses : 4 bébés de 5 mois (moyenne = 166 jours, intervalle = 166 jours), 4 bébés de 6 mois (moyenne = 173 jours, intervalle = 169 - 175 jours), 1 bébé de 7 mois (303 jours) et 3 bébés de 9 mois (moyenne = 285 jours, intervalle = 282 - 285 jours).

Procédure. Cette étude pilote reprend le protocole du pilote K (les mouvements contingents ne sont pas contraints à un seul axe, voir Section 3.3.5) mais en réintroduisant un seuil adaptatif. Cependant, nous avons pour ce protocole conçu un seuil adaptatif préprogrammé permettant de comparer facilement les données interindividuelles. Le seuil de départ est commun pour tous les bébés puis augmente progressivement jusqu'à atteindre un seuil fixe pour le reste de l'expérience, qui est commun à tous les bébés. L'augmentation progressive du seuil suit la même loi pour tous les bébés, tout en étant adaptée au rythme de chaque bébé : à chaque activation de la contingence, le seuil augmente d'un pas et 20 activations de la contingence sont nécessaires pour atteindre le seuil fixe commun à tous les bébés. Ainsi, un bébé bougeant peu et donc activant rarement la contingence verra le seuil augmenter plus doucement qu'un bébé bougeant beaucoup et activant très souvent la contingence. A noter ici que contrairement à l'étude pilote K (Section 3.3.5), le bébé n'est pas exposé à une phase de niveau de base pour ce protocole, l'utilisation d'un seuil adaptatif ne le nécessitant pas.

Résultats et conclusion. Selon le codage vidéo, 6 bébés sur 12 (50%) présentent un score de détection supérieur ou égal à 2 ($Score_{det} \geq 2$) et parmi ces 6 bébés, 4 bébés sur 7 (67%) présentent un score de différenciation supérieur ou égal à 2 ($Score_{dif} \geq 2$). Ce protocole expérimental semble donc être un compromis intéressant pour de futurs travaux : celui-ci ne crée pas de biais pour la comparaison des données interindividuelles, tout en offrant un taux de détection/différenciation convenable.

3.4 Conclusion

Cette série de douze études pilotes nous a amenés à adopter le protocole de l'étude pilote L (Section 3.3.6) en tant que base de futurs travaux sur l'étude de la sensibilité aux contingences sensori-motrices et de l'exploitation de cette sensibilité dans le développement du savoir-faire corporel. En effet, ce protocole est celui présentant le meilleur compromis entre taux de détection/différenciation

(respectivement 50% et 67%), facilité de mise en place (au laboratoire sur une seule séance) et clarté dans l'interprétation des résultats (possibilité de comparer les données interindividuelles). Cette série d'études pilotes a cependant mis en exergue la difficulté de trouver un protocole expérimental permettant aux bébés de moins d'un an de facilement détecter/affiner une contingence sensori-motrice. Les données récoltées au cours de cette série d'études pilotes nous offrent l'opportunité d'explorer certaines des questions qui avaient été soulevées dans les [Chapitre 1](#), [Chapitre 2](#) et [Chapitre 3](#). L'exploration de ces questions et les conclusions en découlant sont présentées dans la section suivante ([Section 4](#)).

4 Analyses des données

Nous avons exploité les données récoltées durant ces études pilotes afin de répondre à une série de questions identifiées suite aux revues de la littératures présentées aux [Chapitre 1](#), [Chapitre 2](#) et [Chapitre 3](#). Ces questions peuvent être séparées en trois catégories.

Les questions relatives aux facteurs influençant les capacités de détection et de différenciation d'une contingence sensorimotrice :

- Influence de l'âge : Les bébés montrent-ils de meilleures capacités à détecter et différencier une contingence au fur et à mesure du développement ?
- Influence des conditions d'exposition : Les bébés sont-ils meilleurs pour détecter et différencier une contingence lorsque l'exposition à celle-ci est effectuée à domicile plutôt qu'au laboratoire ?
- Influence du nombre de sessions : Un apprentissage sur plusieurs sessions plutôt qu'une seule session favorise-t-il la détection et la différenciation d'une contingence ?
- Influence de la saillance de l'action : Une contingence impliquant une action très saillante est-elle plus facilement détectée et différenciée par un bébé qu'une contingence impliquant une action peu saillante ?
- Influence du paramètre spatial : Les bébés sont-ils meilleurs à détecter et différencier les contingences distales ou proximales ? Cela évolue-t-il avec l'âge ?

Les questions relatives au transfert et à la généralisation :

- Les bébés sont-ils capables de transférer l'apprentissage d'une contingence d'un bras à l'autre? Cela dépend-il de l'âge ?
- Les bébés sont-ils capables de généraliser l'apprentissage d'une contingence à une autre contingence ? Cela dépend-il de l'âge ?

Les questions relatives aux méthodes de mesure :

- La durée de la session d'apprentissage (avant que le bébé ne soit agité) est-elle un indicateur de l'apprentissage d'une contingence sensorimotrice ?

Les questions, les analyses statistiques réalisées afin d'y répondre et les résultats de ces analyses sont présentés dans les paragraphes suivants.

Sélection des données. Nous avons pris en compte dans ces analyses (mis à part lorsqu'une indication contraire est précisée) uniquement les données du premier essai des bébés rencontrés au laboratoire et les données du meilleur jour d'entraînement pour les bébés rencontrés sur plusieurs jours à leur domicile (Pilote E, voir [Figure 5.3](#) : Bébé n°1 : Jour 4, Bébé n°2 : Jour 2, Bébé n°3 : Jour 2, Bébé n°4 : Jour 3, Bébé n°5 : Jour 1, Bébé n°6 : Jour 1 et Pilote F, voir [Figure 5.4](#) : Bébé n°1 : Jour 1 et Bébé n°2 : Jour 1). De plus, nous n'avons pas pris en compte dans les analyses les données des bébés inclus dans la condition contrôle du Pilote B (Pilote Bc). La majorité des analyses (sauf [Section 4.1.2](#) et [Section 4.1.3](#)) ont été réalisées sur les bébés rencontrés au laboratoire uniquement et cela afin de créer une plus grande homogénéité entre les conditions.

Analyses. Nous avons réalisé trois types d'analyse :

- Des tests de Fisher (équivalent du χ^2 pour des petits effectifs) afin de comparer le nombre de bébés ayant appris la contingence ($Score_{det}$ ou $Score_{dif} \geq 2$) et le nombre de bébés ne l'ayant pas apprise ($Score_{det}$ ou $Score_{dif} < 2$) dans différentes conditions.
- Des corrélations (méthode de type Kendall, équivalent de Pearson pour des petits effectifs) afin de mesurer la relation entre l'apprentissage d'une contingence ($Score_{det}$ ou $Score_{dif}$) et différents facteurs.
- Des régressions linéaires simples afin de mesurer le pouvoir prédictif de différents facteurs sur la capacité des bébés à apprendre une contingence ($Score_{det}$ ou $Score_{dif}$).

4.1 Capacités de détection et de différenciation d'une contingence

Nous présentons dans cette section les analyses effectuées pour répondre à la première catégorie de questions, consistant à mesurer l'influence de cinq facteurs (voir liste de questions ci-dessus) sur les capacités de détection et de différenciation d'une contingence sensorimotrice chez le bébé. Afin de décorrélérer les capacités des bébés de différenciation de celles de détection, nous avons conservé pour les analyses en différenciation uniquement les données des bébés ayant détecté la contingence. Pour cela, nous avons séparé les 80 bébés ayant été exposés à une contingence pour laquelle un seul bras était « connecté » (toutes les études pilotes sauf A (Section 3.1.1) et B (Section 3.1.2)) en deux groupes: les bébés présentant un score de détection inférieur à 2 (40 bébés) et les bébés présentant un score de détection supérieur ou égal à 2 (40 bébés).

4.1.1 Influence de l'âge : Les bébés montrent-ils de meilleures capacités à détecter et différencier une contingence au fur et à mesure du développement ?

Nous avons cherché par cette première analyse à déterminer si l'âge avait une influence sur la capacité des bébés à détecter et différencier une contingence. Notre hypothèse était alors que les bébés améliorent leur capacité de détection et de différenciation au cours du développement. Afin de tester cette hypothèse, nous avons comparé les résultats obtenus par les bébés en fonction de l'âge — ces analyses ont été réalisées chez les bébés rencontrés au laboratoire uniquement.

Détection. Nous avons réalisé un test de Kruskal-Wallis afin de comparer l'âge en jours des bébés en fonction du score de détection ($Score_{det} \geq 2$ ou $Score_{det} < 2$), pour lequel nous avons obtenu un résultat non-significatif ($\chi^2(1) = .564, p = .453$) (Figure 5.5). Nous avons ensuite réalisé une corrélation (méthode de type Kendall) entre le score de détection et l'âge en jours des bébés. La corrélation obtenue est positive, mais faible et non-significative ($tau = 0.12, p = .121$) (Figure 5.6). Nous avons aussi cherché à déterminer en quelle mesure l'âge en jours était prédictif du score de détection en réalisant une régression linéaire simple. Le modèle obtenu est non-significatif ($F(1, 84) = 2.529, p = .115$), avec $R^2 = .017$ (Figure 5.6).

Différenciation. Pour les 32 bébés testés au laboratoire avec $Score_{det} \geq 2$, nous avons réalisé un test de Fisher afin de comparer l'âge en jours des bébés en fonction du score de différenciation ($Score_{dif} \geq 2$ ou $Score_{dif} < 2$), pour lequel nous avons obtenu un résultat non-significatif ($\chi^2(1) = .169, p = .681$) (Figure 5.5). Nous avons aussi effectué une corrélation (méthode de type Kendall) entre le score de différenciation et l'âge en jours des bébés, pour laquelle nous avons obtenu un coefficient de corrélation positif ($tau = 0.25$). Le résultat de cette corrélation tend vers la significativité ($p = .07$) (Figure 5.6). Nous avons de plus réalisé une régression linéaire simple. Le modèle obtenu est non-significatif ($F(1, 38) = 2.681, p = .109$), avec $R^2 = .04$ (Figure 5.6)

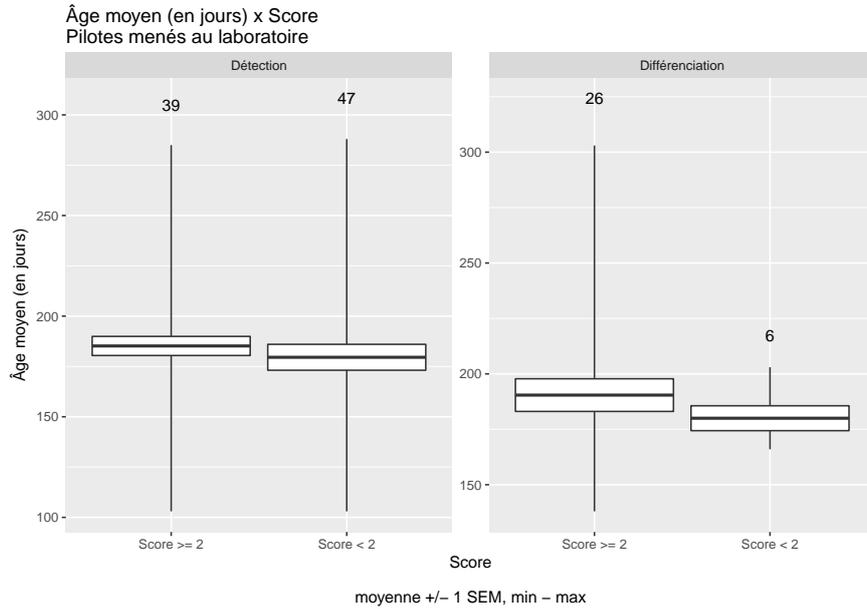


Figure 5.5 – Âge moyen en jours en fonction du score de détection (≥ 2 ou < 2) et en fonction du score de différenciation (≥ 2 ou < 2). Les analyses portent sur le premier essai des bébés testés au laboratoire. En différenciation, seuls les bébés avec $Score_{det} \geq 2$ ont été inclus. Les chiffres indiqués correspondent au nombre de bébés dans chaque groupe.

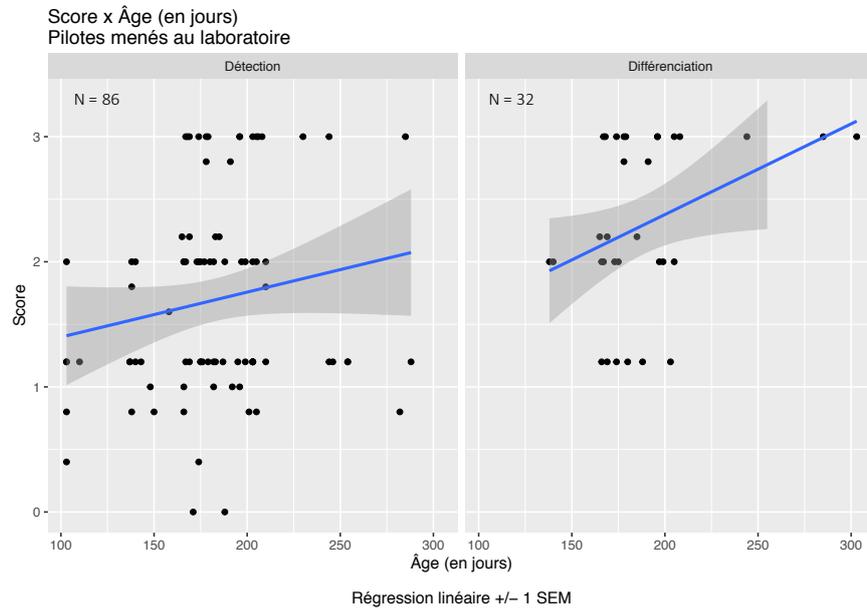


Figure 5.6 – Régressions linéaires du score de détection et du score de différenciation en fonction de l'âge en jours. Les analyses portent sur le premier essai des bébés testés au laboratoire. En différenciation, seuls les bébés avec $Score_{det} \geq 2$ ont été inclus.

Conclusion. Nous n'observons pas de nette évolution avec l'âge dans les capacités de détection et de différenciation d'une contingence. Cependant, la corrélation positive obtenue pour la différenciation suggère que les bébés pourraient montrer une amélioration de leur savoir-faire corporel entre l'âge de 4 et 9 mois, ce qui est en accord avec notre hypothèse selon laquelle le savoir-faire corporel évolue du global au local durant les premiers mois de la vie. Cependant, le très faible nombre de bébés testés et l'absence d'homogénéité d'âges des bébés entre les études pilotes ne permettent pas de conclure avec assurance sur l'influence de l'âge sur les capacités de détection et de différenciation d'une contingence sensorimotrice chez le bébé.

4.1.2 Influence des conditions d'exposition : Les bébés sont-ils meilleurs pour détecter et différencier une contingence lorsque l'exposition à celle-ci est effectuée à domicile plutôt qu'au laboratoire ?

Nous avons ensuite cherché à déterminer s'il existait une différence entre une exposition à domicile et une exposition au laboratoire. Nous faisons alors l'hypothèse qu'une exposition à domicile permet une meilleure détection et différenciation qu'une exposition au laboratoire (voir Pilote E, Section 3.2.1, pour une explication détaillée de cette hypothèse). Pour tester cette hypothèse, nous avons comparé des études présentant des protocoles similaires en tout point mis à part les conditions d'exposition (« laboratoire » ou « domicile ») : les Pilotes C (Section 3.1.3) et D (Section 3.1.4) d'un côté (« laboratoire ») et les Pilotes E (Section 3.2.1) et F (Section 3.2.2) de l'autre (« domicile »). Nous avons ici pris en compte les résultats du premier jour pour les bébés rencontrés sur plusieurs jours à leur domicile.

Détection. Nous avons réalisé un test de Fisher afin de comparer le nombre de bébés avec $Score_{det} \geq 2$ et le nombre de bébés avec $Score_{det} < 2$ dans la condition « laboratoire » et la condition « domicile ». Le résultat obtenu est non-significatif ($p = .667$) (Figure 5.7).

Différenciation. Pour les 6 bébés testés à domicile et les 11 bébés testés au laboratoire avec $Score_{det} \geq 2$, nous avons fait un test de Fisher afin de comparer le nombre de bébés avec $Score_{dif} \geq 2$ et le nombre de bébés avec $Score_{dif} < 2$ dans la condition « laboratoire » et la condition « domicile ». Nous avons obtenu un résultat non-significatif ($p = .6$) (Figure 5.7). Les données présentées en Figure 5.7 suggèrent qu'une exposition au laboratoire faciliterait la différenciation d'une contingence (dès lors que celle-ci a été détectée) comparé à une exposition à domicile : le pourcentage de bébés présentant un score de différenciation supérieur ou égal à 2 ($Score_{dif} \geq 2$) est supérieur à 70% pour les bébés testés au laboratoire, alors qu'il est seulement de 50% pour les bébés testés à domicile.

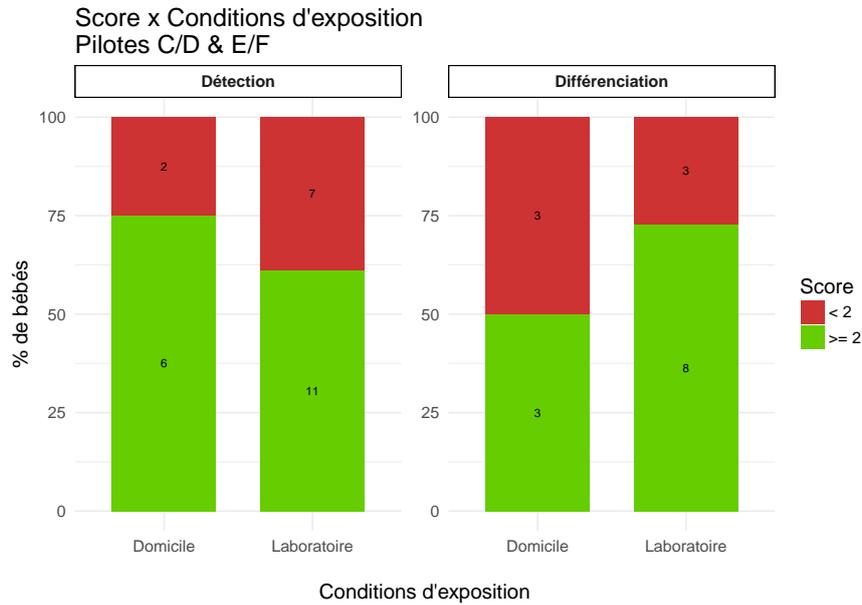


Figure 5.7 – Résultats en détection et en différenciation en fonction des conditions d'exposition (domicile ou laboratoire). Les analyses portent sur le premier jour des bébés testés dans les études pilotes E et F. En différenciation, seuls les bébés avec $Score_{det} \geq 2$ ont été inclus. Les chiffres indiqués correspondent au nombre de bébés dans chaque groupe.

Conclusion. Ces résultats suggèrent que, contrairement à notre hypothèse, il ne semble pas y avoir d'effet positif d'une exposition à domicile sur la détection et la différenciation d'une contingence. Nous observons même une tendance inverse concernant la différenciation. Cette tendance pourrait s'expliquer par la différence d'âge entre les bébés testés au laboratoire (âge moyen = 184 jours) et les bébés testés à domicile (âge moyen = 136 jours). Il serait cependant nécessaire de comparer les résultats d'une étude longitudinale menée au laboratoire à ceux de nos études longitudinales menées à domicile afin de pouvoir conclure avec certitude sur l'effet des conditions d'exposition sur la détection et la différenciation d'une contingence.

4.1.3 Influence du nombre de sessions : Un apprentissage sur plusieurs sessions plutôt qu'une seule favorise-t-il la détection et la différenciation d'une contingence ?

Nous avons ensuite mesuré l'effet du nombre de sessions d'apprentissage sur la capacité des bébés à détecter et différencier une contingence (voir [Chapitre 1](#)). Nous faisons l'hypothèse que la capacité des bébés à détecter et différencier une contingence est plus élevée pour un apprentissage réparti sur plusieurs sessions que pour un apprentissage en une seule session (voir par ex. [Rovee-Collier et al., 1978](#), où les auteurs observent une différenciation uniquement après plusieurs jours d'entraînement). Pour tester ces hypothèses, nous avons comparé des protocoles similaires en tout point mis à part le nombre de sessions d'apprentissage (« une session » ou « plusieurs sessions »): les Pilotes C ([Section 3.1.3](#)) et D ([Section 3.1.4](#)) d'un côté (« une session ») et les Pilotes E ([Section 3.2.1](#)) et F ([Section 3.2.2](#)) de l'autre (« plusieurs sessions »), pour lesquels nous avons pris en compte uniquement les données de la session d'apprentissage à laquelle le bébé avait montré les meilleurs résultats. A noter qu'ici le temps total d'exposition à la contingence était plus long dans le cas d'une exposition sur plusieurs sessions que dans le cas d'une exposition sur une seule session.

Détection. Nous avons réalisé un test de Fisher afin de comparer le nombre de bébés avec $Score_{det} \geq 2$ et le nombre de bébés avec $Score_{det} < 2$ dans la condition « une session » et la condition « plusieurs sessions », pour lequel nous avons obtenu une tendance ($p = .062$) ([Figure 5.8](#)). Les données présentées en [Figure 5.8](#) suggèrent qu'un apprentissage réparti sur plusieurs sessions faciliterait la détection d'une contingence comparé à un apprentissage en une seule session: le pourcentage de bébés avec $Score_{det} \geq 2$ est de 100% pour les bébés ayant bénéficié d'un apprentissage réparti sur plusieurs sessions, alors qu'il est seulement de 60% pour les bébés testés en une seule session.

Différenciation. Pour les 11 bébés testés en une seule session et les 8 bébés testés sur plusieurs sessions avec $Score_{det} \geq 2$, nous avons fait un test de Fisher afin de comparer le nombre de bébés avec $Score_{dif} \geq 2$ et le nombre de bébés avec $Score_{dif} < 2$ dans la condition « une session » et la condition « plusieurs sessions ». Nous avons obtenu un résultat non-significatif ($p = 1$) ([Figure 5.8](#)).

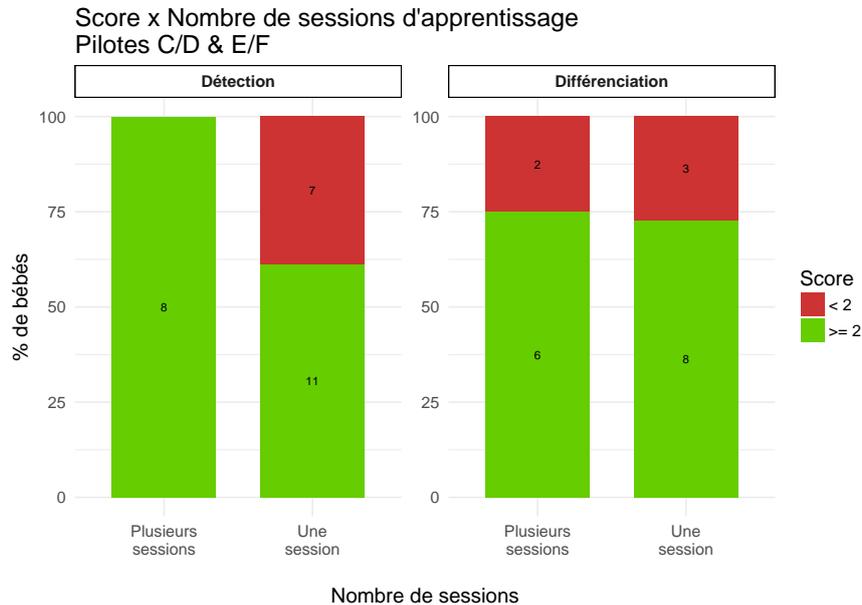


Figure 5.8 – Résultats en détection et en différenciation en fonction du nombre de sessions d'apprentissage (plusieurs sessions ou une session). Les analyses portent le meilleur score des bébés testés dans les études pilotes E et F. En différenciation, seuls les bébés avec $Score_{det} \geq 2$ ont été inclus. Les chiffres indiqués correspondent au nombre de bébés dans chaque groupe.

Conclusion. Les résultats concernant la détection sont en accord avec notre hypothèse : les bébés bénéficient d'une exposition à la contingence sur plusieurs sessions. Pour la différenciation, contrairement à notre hypothèse, il apparaît que la capacité des bébés ayant détecté une contingence à l'affiner au membre « connecté » n'est pas influencée par le nombre de sessions d'apprentissage. Ce second résultat suggère alors que l'échec de différenciation montré par certains des bébés ayant détecté la contingence (8 bébés toutes études confondues) ne peut pas être uniquement expliqué par un trop faible temps d'exposition à la contingence mais par une incapacité à différencier le membre « connecté ». Ainsi, il semblerait que certains bébés sont capables d'affiner une contingence dès lors qu'ils l'ont détectée et que d'autres n'en sont pas capables et cela même après plusieurs sessions d'apprentissage — ce qui est en accord avec l'hypothèse générale de ce travail de thèse selon laquelle le savoir-faire corporel est au départ indifférencié et qu'un savoir-faire corporel différencié s'observe à partir de 3 - 4 mois, âge des bébés testés sur plusieurs sessions (voir [Section 1](#) du [Chapitre 4](#)).

4.1.4 Influence de la saillance de l'action : Une contingence impliquant une action très saillante est-elle plus facilement détectée et différenciée par un bébé qu'une contingence impliquant une action peu saillante ?

La troisième question que nous avons explorée concerne l'influence de la saillance de l'action sur les capacités de détection et de différenciation. Nous faisons ici l'hypothèse, basée sur la revue de la littérature présentée au [Chapitre 1](#), que plus l'action impliquée dans une contingence est saillante, meilleurs sont les bébés à détecter et différencier celle-ci. Nous avons alors cherché à mesurer l'influence de trois paramètres ayant trait à la saillance de l'action contingente : le seuil d'activation de la contingence, le nombre de bras « connectés » et le nombre d'axes « connectés ». Les analyses présentées ci-dessous ont été réalisées chez les bébés rencontrés au laboratoire uniquement.

Effet du seuil

Notre hypothèse était que la détection et la différenciation d'une contingence sont facilitées par un seuil adaptatif celui-ci permettant d'utiliser une action contingente très saillante (lorsque le seuil est haut) tout en offrant une forte exposition à la contingence en début de session (lorsque le seuil est bas). Pour tester ces hypothèses, nous avons comparé les résultats des études pilotes ayant un seuil fixe (Pilotes A ([Section 3.1.1](#)), B ([Section 3.1.2](#)), C ([Section 3.1.3](#)), G ([Section 3.3.1](#)), I ([Section 3.3.3](#)), K ([Section 3.3.5](#)) — les pilotes A ([Section 3.1.1](#)) et B ([Section 3.1.2](#)) ne sont inclus dans les analyses portant sur la différenciation) et les résultats des études pilotes ayant un seuil adaptatif (Pilotes D ([Section 3.1.4](#)), H ([Section 3.3.2](#)), J ([Section 3.3.4](#)), L ([Section 3.3.6](#))) — ces analyses ont été réalisées chez les bébés rencontrés au laboratoire uniquement.

Détection. Nous avons réalisé un test de Fisher afin de comparer le nombre de bébés avec $Score_{det} \geq 2$ et le nombre de bébés avec $Score_{det} < 2$ dans la condition « seuil fixe » et la condition « seuil adaptatif » dont le résultat est non-significatif ($p = .386$) (Figure 5.9).

Différenciation. Pour les 19 bébés exposés à une contingence avec un seuil fixe et les 20 bébés exposés à une contingence avec un seuil adaptatif avec $Score_{det} \geq 2$, nous avons fait un test de Fisher afin de comparer le nombre de bébés avec $Score_{dif} \geq 2$ et le nombre de bébés avec $Score_{dif} < 2$ dans la condition « seuil fixe » et la condition « seuil adaptatif ». Le résultat de ce test est non-significatif ($p = 1$) (Figure 5.9).

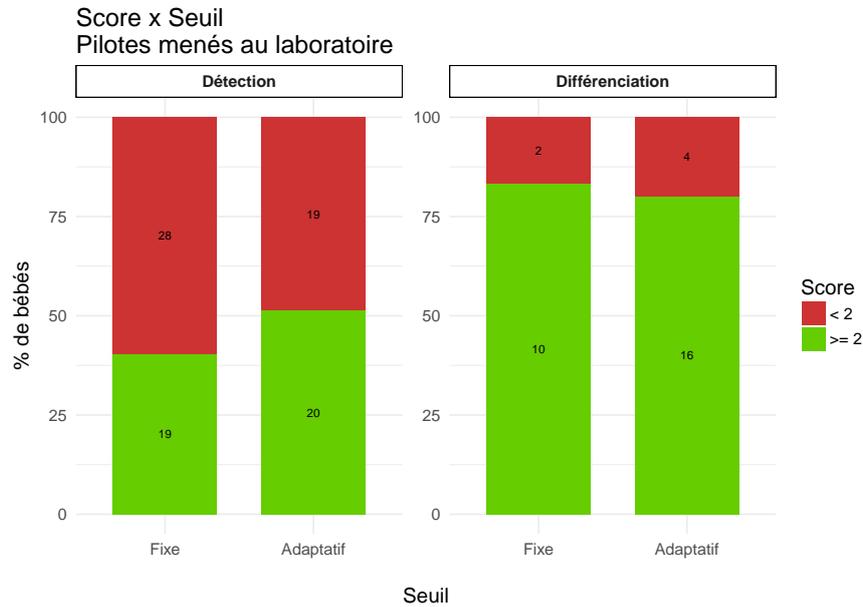


Figure 5.9 – Résultats en détection et en différenciation en fonction du seuil (fixe ou adaptatif). Les analyses portent sur le premier essai des bébés testés au laboratoire. En différenciation, seuls les bébés avec $Score_{det} \geq 2$ ont été inclus. Les chiffres indiqués correspondent au nombre de bébés dans chaque groupe.

Conclusion. Les résultats sont contraires à notre hypothèse : les bébés ne semblent pas meilleurs à détecter et différencier une contingence lorsque celle-ci implique un seuil adaptatif plutôt qu'un seuil fixe.

Effet du bras « connecté »

Nous faisons ici l'hypothèse que les contingences les plus facilement détectées et différenciées par les bébés sont celles impliquant un « *shaping* » (un passage de deux bras « connectés » au début de la session à un seul bras « connecté » ensuite) car elles permettent d'utiliser une action contingente très saillante (lorsque seul l'un bras est « connecté ») tout en offrant une forte exposition à la contingence en début de session (lorsque les deux bras sont « connectés »). Concernant la comparaison entre les contingences impliquant les mouvements d'un seul bras et celles impliquant les mouvements des deux bras, nous faisons l'hypothèse que les premières sont plus facilement détectées car plus saillantes. Pour tester ces hypothèses, nous avons comparé les résultats des études pilotes ayant comme action contingente les mouvements d'un seul bras du bébé (Pilotes C (Section 3.1.3), G (Section 3.3.1), H (Section 3.3.2), I (Section 3.3.3), K (Section 3.3.5)), les résultats des études pilotes ayant comme action contingente les mouvements des deux bras du bébé (Pilotes A (Section 3.1.1), B (Section 3.1.2) ; non inclus dans les analyses

portant sur la différenciation) et les résultats des études pilotes impliquant un « *shaping* » (Pilotes D (Section 3.1.4), J (Section 3.3.4), L (Section 3.3.6)). Ces analyses ont été réalisées chez les bébés rencontrés au laboratoire uniquement.

Détection. Nous avons réalisé un test de Fisher afin de comparer le nombre de bébés avec $Score_{det} \geq 2$ et le nombre de bébés avec $Score_{det} < 2$ dans les conditions « 1 bras », « 2 bras » et « *shaping* ». Nous avons obtenu une tendance ($p = .06$) (Figure 5.10). Les résultats présentés en Figure 5.10 suggèrent que la condition « *shaping* » (63% des bébés avec $Score_{det} \geq 2$) facilite la détection d'une contingence comparée à la condition « 1 bras » (34% des bébés avec $Score_{det} \geq 2$) et potentiellement aussi comparée à la condition « 2 bras » (46% des bébés avec $Score_{det} \geq 2$).

Différenciation. Pour les 15 bébés exposés à une contingence avec un seul bras « connecté » et les 17 bébés exposés à une contingence avec un « *shaping* » avec $Score_{det} \geq 2$, nous avons fait un test de Fisher afin de comparer le nombre de bébés avec $Score_{dif} \geq 2$ et le nombre de bébés avec $Score_{dif} < 2$ dans la condition « 1 bras » et la condition « *shaping* ». Nous avons obtenu un résultat non-significatif ($p = .659$) (Figure 5.10).

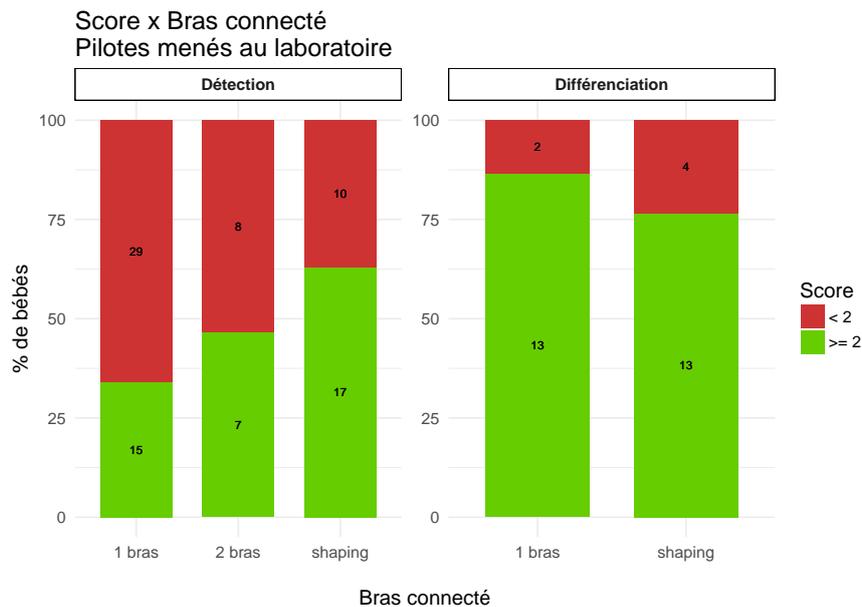


Figure 5.10 – Résultats en détection et en différenciation en fonction du bras « connecté » (1 bras, 2 bras ou « *shaping* »). Les analyses portent sur le premier essai des bébés testés au laboratoire. En différenciation, seuls les bébés avec $Score_{det} \geq 2$ ont été inclus. Les chiffres indiqués correspondent au nombre de bébés dans chaque groupe.

Conclusion. Les résultats suggèrent que les bébés sont meilleurs à détecter une contingence impliquant un « *shaping* » qu'une contingence impliquant comme action contingente les mouvements d'un seul bras ce qui est en accord avec notre première hypothèse selon laquelle la détection d'une contingence est facilitée par une forte exposition en début de session suivie d'une réduction de l'action contingence aux mouvements du bras « connecté » uniquement. Cependant, contrairement à notre seconde hypothèse, nous n'avons pas obtenu de différence entre la condition « 1 arm » et la condition « 2 arms » pour la détection. De plus, contrairement à notre hypothèse, nous n'avons pas obtenu d'effet du bras « connecté » (1 bras ou « *shaping* ») sur la capacité des bébés ayant détecté une contingence à affiner celle-ci.

Effet de l'axe « connecté »

Nous avons ensuite cherché à savoir si contraindre l'action contingente à un seul axe de l'espace (axe x de l'accéléromètre ici, voir section « Pilote I », [Section 3.3.3](#)) et donc rendre le mouvement contingent très saillant était bénéfique pour la détection par rapport à ne pas contraindre le mouvement, celui-ci étant alors moins saillant. Nous faisons l'hypothèse que les bébés présenteraient de meilleurs scores pour la condition dans laquelle le mouvement était le plus saillant (1 axe). Pour tester cette hypothèse, nous avons comparé les études réalisées dans les mêmes conditions mais pour lesquelles le nombre d'axe du mouvement contingent différait (1 axe vs. 3 axes), c'est-à-dire les Pilotes I ([Section 3.3.3](#)) et J ([Section 3.3.4](#)) d'un côté (1 axe) et les Pilotes K ([Section 3.3.5](#)) et L ([Section 3.3.6](#)) de l'autre (3 axes).

Détection. Nous avons réalisé un test de Fisher afin de comparer le nombre de bébés avec $Score_{det} \geq 2$ et le nombre de bébés avec $Score_{det} < 2$ dans la condition « 1 axe » et la condition « 3 axes ». Nous avons obtenu un résultat non-significatif ($p = 1$) ([Figure 5.11](#)).

Différenciation. Pour les 5 bébés dans la condition « 1 axe » et les 9 bébés dans la condition « 3 axes » avec $Score_{det} \geq 2$, nous avons fait un test de Fisher afin de comparer le nombre de bébés avec $Score_{dif} \geq 2$ et le nombre de bébés avec $Score_{dif} < 2$ dans la condition « 1 axe » et la condition « 3 axes ». Nous avons obtenu un résultat non-significatif ($p = .258$) ([Figure 5.11](#)).

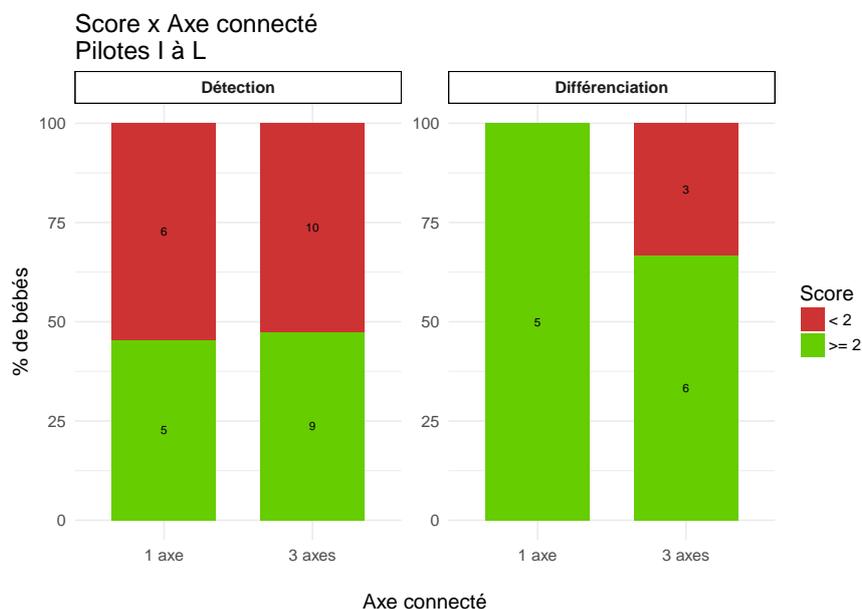


Figure 5.11 – Résultats en détection et en différenciation en fonction de l'axe « connecté » (1 axe ou 3 axes). Les analyses portent sur le premier essai des bébés testés dans les études pilotes I à L. En différenciation, seuls les bébés avec $Score_{det} \geq 2$ ont été inclus. Les chiffres indiqués correspondent au nombre de bébés dans chaque groupe.

Conclusion. Ces résultats suggèrent que la saillance du mouvement contingent (1 axe vs. 3 axes) n'a pas d'influence sur les capacités de détection et de différenciation des bébés — ce qui est contraire à notre hypothèse. Cependant, la condition « 1 axe » que nous avons utilisé était problématique du fait que l'axe « connecté » était fonction de la position de l'accéléromètre et non de la position du bras du bébé, ce qui a pu induire une confusion dès lors que la position de l'accéléromètre était modifiée sans que celle du bras ne le soit (voir Pilote J (Section 3.3.4) pour plus de détails).

4.1.5 Influence du paramètre spatial : Les bébés sont-ils meilleurs à détecter et différencier les contingences distales ou proximales ? Cela évolue-t-il avec l'âge ?

La question investiguée ici — malheureusement peu étudiée dans la littérature — concerne les capacités de détection et de différenciation des contingences en fonction du paramètre spatial mis en jeu (distal ou proximal). Les bébés sont-ils plus enclins à détecter les contingences distales ou les contingences proximales ? Cela dépend-t-il de l'âge ? Nous faisons l'hypothèse que les bébés ne possèdent pas une sensibilité équivalente à ces deux types de contingence en fonction de l'âge. Nous supposons qu'à l'âge auquel nous testons les bébés (3 - 9 mois), ces derniers sont intrinsèquement motivés à explorer les contingences leur permettant d'exercer leurs habiletés manuelles,

c'est-à-dire les contingences proximales, et non les contingences distales. Nous supposons de plus que cette détection privilégiée des contingences proximales se renforce entre 3 et 9 mois, période durant laquelle les bébés affinent leurs habiletés manuelles. Pour tester ces hypothèses, nous avons comparé les résultats obtenus par les bébés exposés à une contingence distale (Pilotes A, B, C et D, Section 3.1) et les bébés exposés à une contingence proximale (Pilotes G, H, I, J, K et L, Section 3.3) — ces analyses ont été réalisées chez les bébés rencontrés au laboratoire uniquement.

Détection. Nous avons réalisé un test de Fisher afin de comparer le nombre de bébés avec $Score_{det} \geq 2$ et le nombre de bébés avec $Score_{det} < 2$ dans la condition « distal » et la condition « proximal ». Nous avons obtenu un résultat non-significatif ($p = .19$) (Figure 5.12). Néanmoins, les données présentées en Figure 5.12 suggèrent que les bébés exposés à une contingence distale ont de meilleurs résultats en détection que les bébés exposés à une contingence proximale.

Différenciation. Pour les 18 bébés exposés à une contingence distale et les 21 bébés exposés à une contingence proximale avec $Score_{det} \geq 2$, nous avons fait un test de Fisher afin de comparer le nombre de bébés avec $Score_{dif} \geq 2$ et le nombre de bébés avec $Score_{dif} < 2$ dans la condition « proximal » et la condition « distal ». Nous avons obtenu un résultat non-significatif ($p = .39$) (Figure 5.12).

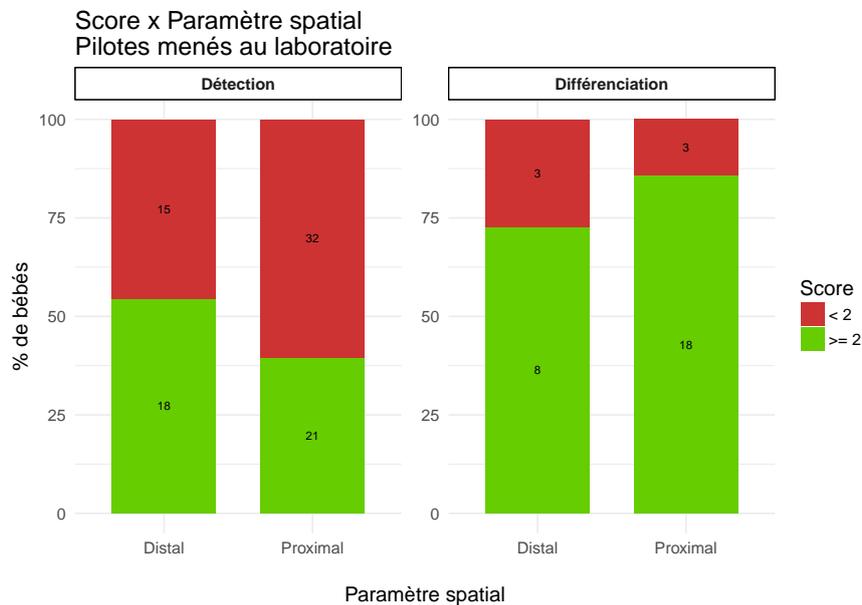


Figure 5.12 – Résultats en détection et en différenciation en fonction du paramètre spatial de la contingence (distal ou proximal). Les analyses portent sur le premier essai des bébés testés au laboratoire. En différenciation, seuls les bébés avec $Score_{det} \geq 2$ ont été inclus. Les chiffres indiqués correspondent au nombre de bébés dans chaque groupe.

Conclusion. Contrairement à notre hypothèse, les bébés âgés de 3 à 9 mois ne présentent pas de meilleures capacités de détection et de différenciation pour les contingences proximales plutôt que distales. Nous observons même une faible tendance suggérant que les bébés seraient meilleurs pour détecter des contingences distales que proximales.

Interaction avec l'âge

Nous faisons l'hypothèse, comme exprimé précédemment, que l'impact du paramètre spatial sur la sensibilité aux contingences sensorimotrice est influencé par l'âge des bébés et que la potentielle préférence des bébés pour les contingences proximales plutôt que distales se renforce au cours du développement. Pour vérifier cette hypothèse, nous avons premièrement réalisé des corrélations (méthode de type Kendall) entre les scores de détection et de différenciation et l'âge en jours pour les bébés exposés à des contingences distales d'une part et pour les bébés exposés à des contingences proximales d'autre part. Nous avons ensuite cherché à déterminer en quelle mesure l'âge en jours était prédictif du score de détection et de différenciation, à nouveau en séparant les bébés exposés à des contingences distales et les bébés exposés à des contingences proximales.

Détection. Les corrélations obtenues sont positives mais faibles et non-significatives pour la condition « distal » ($tau = 0.02$, $p = .859$) et pour la condition « proximal » ($tau = 0.09$, $p = .387$) (Figure 5.13). Les modèles de régression linéaire obtenus sont également non-significatifs, aussi bien pour les bébés exposés à une contingence distale ($F(1, 31) = 1.281$, $p = .266$, avec $R^2 = .009$) que proximale ($F(1, 51) = 1.184$, $p = .281$, avec $R^2 = .003$) (Figure 5.13).

Différenciation. Pour les 11 bébés exposés à une contingence distale et avec $Score_{det} \geq 2$, la corrélation entre le score de différenciation et l'âge est positive mais faible et non-significative ($tau = 0.07$, $p = .794$) (Figure 5.13). Le modèle de régression linéaire obtenu est lui aussi non-significatif ($F(1, 9) = .592$, $p = .461$, avec $R^2 = -.042$) (Figure 5.13). Pour les 21 bébés exposés à une contingence proximale et avec $Score_{det} \geq 2$, nous observons une corrélation positive et moyennement élevée entre le score de différenciation et l'âge et qui tend vers la significativité ($tau = 0.30$, $p = .089$) (Figure 5.13). Le modèle linéaire est lui significatif ($F(1, 19) = 5.33$, $p = .032$, avec $R^2 = .178$) (Figure 5.13). Il est important de noter que la différence de résultat entre les deux types de paramètre spatiaux pourrait s'expliquer par un plus petit nombre de bébés (11 bébés) dans la condition distale que dans la condition proximale (21 bébés).



Figure 5.13 – Régressions linéaires du score de détection et du score de différenciation en fonction de l'âge en jours pour les études pilotes impliquant une contingence distale d'une part (orange) et pour les études pilotes impliquant une contingence proximale d'autre part (bleu). Les analyses portent sur le premier essai des bébés testés au laboratoire. En différenciation, seuls les bébés avec $Score_{det} \geq 2$ ont été inclus. Les chiffres indiqués correspondent au nombre de bébés dans chaque groupe.

Conclusion. Les résultats obtenus en détection sont contraires à notre hypothèse selon laquelle les bébés seraient de moins en moins intéressés par les contingences distales avec l'âge et de plus en plus intéressés par les contingences proximales. Néanmoins, en ce qui concerne la capacité de différenciation d'une contingence des bébés ayant détecté une contingence à affiner celle-ci au bras « connecté », nos résultats suggèrent que celle-ci augmenterait entre 4 et 9 mois mais uniquement pour les contingences proximales et non pour les contingences distales. Ce résultat est cependant à considérer avec précaution car il pourrait s'expliquer par un manque d'homogénéité entre les deux conditions.

4.2 Transfert et généralisation

Nous traitons dans cette section la deuxième catégorie de questions, traitant des capacités de transfert et de généralisation d'une contingence sensorimotrice chez le bébé.

4.2.1 Les bébés sont-ils capables de transférer l'apprentissage d'une contingence d'un bras à l'autre ? Cela dépend-il de l'âge ?

La question explorée dans cette section concerne le transfert d'apprentissage d'un bras à l'autre, c'est-à-dire le transfert de l'apprentissage d'une contingence à une contingence similaire en tout

point mis à part que le bras « connecté » est inversé. Pour 16 des bébés testés dans nos études (rencontrés au laboratoire ou à domicile), nous avons réalisé un second essai pour lequel nous avons inversé le bras « connecté ». Pour les bébés testés sur plusieurs jours à domicile et ayant été exposés à deux sessions de transfert, nous avons utilisé uniquement le meilleur des deux résultats (Pilote F : Bébé n°1, Bébé n°2). Parmi ces 16 bébés, uniquement 5 bébés présentaient un $Score_{det}$ et $Score_{dif} \geq 2$ au 1^{er} essai (avant le transfert du bras « connecté »). Nous avons conservé uniquement ces 5 bébés dans les analyses et nous avons mesuré leur capacité de détection et de différenciation de la contingence après transfert du bras « connecté ». Nous faisons l'hypothèse que les bébés à l'âge auquel nous les testons (entre 3 et 9 mois) possèdent la capacité de transférer l'apprentissage d'une contingence d'un bras à l'autre et que cette capacité s'améliore au fur et à mesure du développement (voir Rovee-Collier et al., 1978; Watanabe & Taga, 2009).

Détection. Nous observons que 100% des bébés ont atteint un $Score_{det} \geq 2$ après le transfert (5 sur 5 bébés) (Figure 5.14). Nous avons mesuré l'influence de l'âge sur ce résultat en réalisant une corrélation entre le score de détection ($Score_{det}$) post-transfert et l'âge en jours des bébés, ainsi qu'une régression linéaire du score de détection ($Score_{det}$) post-transfert en fonction de l'âge en jours (Figure 5.15). La corrélation obtenue est positive et non-significative ($\tau = 0.36$, $p = .479$). La régression est elle aussi non-significative ($F(1, 3) = 1.526$, $p = .305$, avec $R^2 = .116$).

Différenciation. 60% des bébés ont atteint un $Score_{dif} \geq 2$ après le transfert du bras « connecté » (3 sur 5 bébés) (Figure 5.14). Nous avons mesuré l'influence de l'âge sur ce résultat (Figure 5.15). Nous avons premièrement réalisé une corrélation entre le score de différenciation ($Score_{dif}$) post-transfert et l'âge en jours des bébés. La corrélation obtenue est positive mais non-significative ($\tau = 0.67$, $p = .117$). Nous avons aussi réalisé une régression linéaire du score de différenciation ($Score_{dif}$) post-transfert en fonction de l'âge en jours. La régression est elle aussi non-significative ($F(1, 3) = 5.023$, $p = .111$, avec $R^2 = .501$). Néanmoins, les données présentées Figure 5.15 suggèrent que la capacité de différenciation post-transfert s'améliore avec l'âge, les 2 bébés ayant un $Score_{dif} < 2$ étant les deux bébés les plus jeunes (respectivement 129 et 137 jours pour ces deux bébés et 143, 196 et 199 jours pour les trois autres bébés).

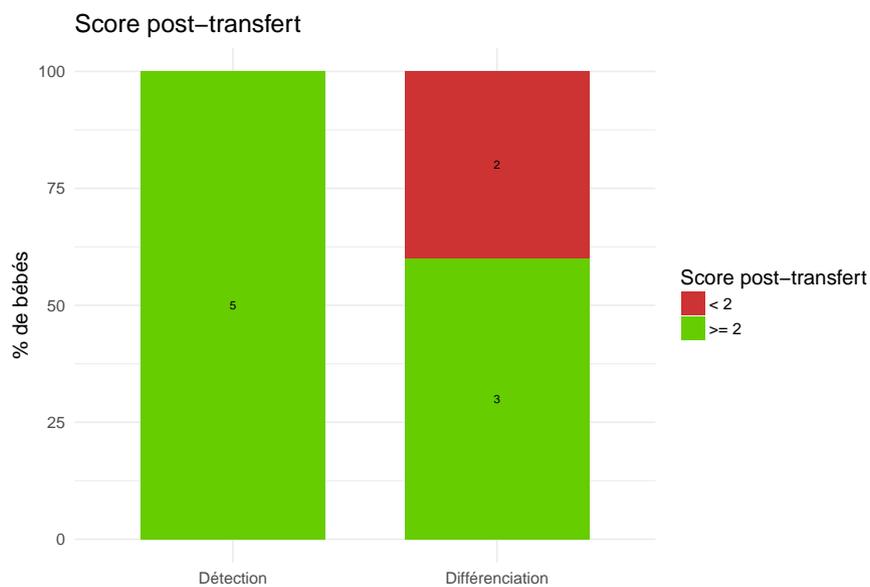


Figure 5.14 – Résultats en détection et en différenciation après le transfert du bras « connecté ». Seuls les bébés avec $Score_{det} \geq 2$ et $Score_{dif} \geq 2$ avant le transfert ont été inclus. Les chiffres indiqués correspondent au nombre de bébés dans chaque groupe.

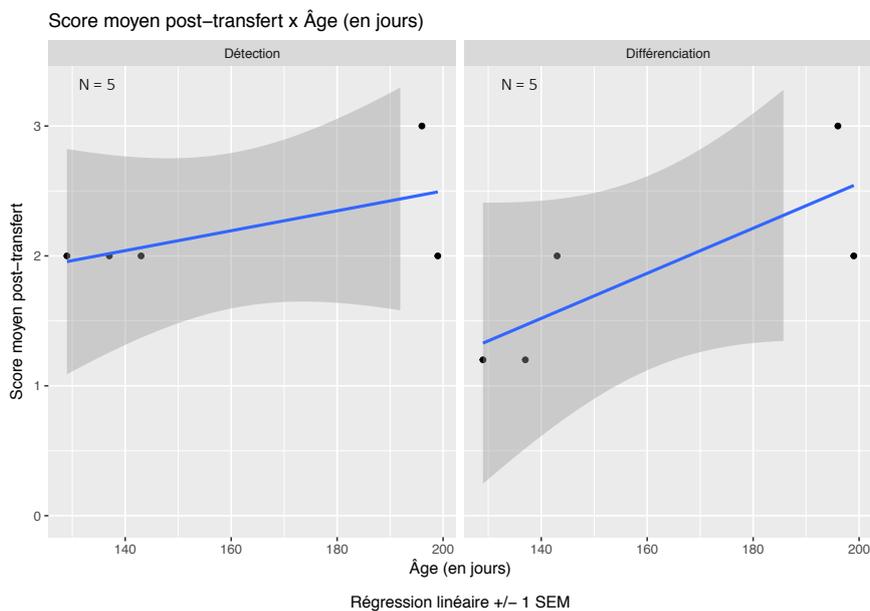


Figure 5.15 – Régressions linéaires du score de détection et du score de différenciation après le transfert du bras « connecté » en fonction de l'âge en jours. Seuls les bébés avec $Score_{det} \geq 2$ et $Score_{dif} \geq 2$ avant le transfert ont été inclus. En différenciation, seuls les bébés avec $Score_{det} \geq 2$ après le transfert ont été inclus, ce qui correspond ici à tous les bébés inclus en détection. Les chiffres indiqués correspondent au nombre de bébés dans chaque groupe.

Conclusion. Les résultats de ces analyses suggèrent que la capacité de transfert d'une contingence d'un bras à l'autre n'est pas encore parfaitement établie chez les bébés avant l'âge de 9 mois. En effet, si tous les bébés semblent capables de détecter la contingence ($Score_{det} \geq 2$) après le transfert, seuls 60% d'entre eux semblent capables de la différencier ($Score_{dif} \geq 2$). Néanmoins, nous notons que la capacité des bébés à différencier la contingence après un changement du bras « connecté » semble s'améliorer au cours du développement. Ces résultats sont toutefois difficiles à interpréter : chez les bébés présentant des $Score_{det}$ et $Score_{dif} \geq 2$ après le transfert de bras « connecté », s'agit-il d'un réel transfert d'apprentissage ou de l'apprentissage d'une nouvelle contingence ? Nous pouvons en effet supposer que les bébés ayant détecté et différencié la contingence avant le changement de bras sont capables de la différencier après le changement de bras soit (1) parce qu'ils sont capables de transférer leur apprentissage de la contingence d'un bras à l'autre ou soit (2) parce qu'ils possèdent une sensibilité élevée à la contingence impliquée dans la tâche et un savoir-faire corporel différencié et cela aussi bien avant qu'après le changement de bras, ce qui n'implique pas nécessairement qu'ils aient transféré leur apprentissage d'un bras à l'autre.

4.2.2 Les bébés sont-ils capables de généraliser l'apprentissage d'une contingence à une autre contingence ? Cela dépend-il de l'âge ?

Nous avons ensuite investigué la généralisation de l'apprentissage d'une contingence à une autre. Pour 12 des bébés testés dans nos études (rencontrés au laboratoire ou à domicile), nous avons réalisé un second essai pour lequel nous avons cette fois changé la contingence en conservant le même bras « connecté ». Parmi ces 12 bébés, uniquement 8 bébés présentaient un $Score_{det} \geq 2$ au 1^{er} essai (avant le changement de contingence) — à noter qu'ici un $Score_{dif} \geq 2$ au 1^{er} essai n'est pas un critère d'inclusion dans les analyses, la différenciation de la contingence n'étant pas un préalable nécessaire à la généralisation de celle-ci contingence. Nous avons conservé uniquement ces 8 bébés dans les analyses pour la détection et nous avons mesuré leur capacité de détection et de différenciation de la contingence après le changement de contingence. Nous faisons ici l'hypothèse, basée sur la revue de littérature présentée à la [Section 4](#) du [Chapitre 2](#), que les bébés à l'âge auquel nous les testons (3 - 9 mois) ne seraient pas capables de généraliser leur apprentissage d'une contingence à une autre et cela sans évolution entre 3 et 9 mois (voir [Section 4](#) du [Chapitre 2](#) ou [Rovee-Collier, 1999](#), pour une revue de la littérature).

Détection. Nous observons que 50% des bébés ont atteint un $Score_{det} \geq 2$ pour la nouvelle contingence (4 sur 8 bébés) ([Figure 5.16](#)). Nous avons alors mesuré l'influence de l'âge sur ce résultat en réalisant une corrélation entre le score de détection ($Score_{det}$) après le changement de contingence et l'âge en jours des bébés ([Figure 5.17](#)). La corrélation obtenue est négative et non-significative ($tau = -0.19$, $p = .526$). Nous avons aussi réalisé une régression linéaire du

score de détection ($Score_{det}$) après le changement de contingence en fonction de l'âge en jours des bébés (Figure 5.17), dont le résultat est lui aussi non-significatif ($F(1, 6) = .483$, $p = .513$, avec $R^2 = -.080$).

Différenciation. Parmi les 4 bébés avec $Score_{det} \geq 2$ après le changement de contingence, 3 bébés (80%) ont atteint un $Score_{dif} \geq 2$ après le changement de contingence (Figure 5.16). Nous avons mesuré l'influence de l'âge sur la capacité de généralisation des bébés en réalisant une corrélation entre le score de différenciation ($Score_{dif}$) après le changement de contingence et l'âge en jours des bébés (Figure 5.17). La corrélation obtenue est négative et non-significative ($tau = -0.33$, $p = .75$). Nous avons aussi réalisé une régression linéaire du score de différenciation ($Score_{dif}$) après le changement de contingence en fonction de l'âge en jours des bébés (Figure 5.17), dont le résultat est non-significatif ($F(1, 2) = .060$, $p = .829$, avec $R^2 = -.456$).

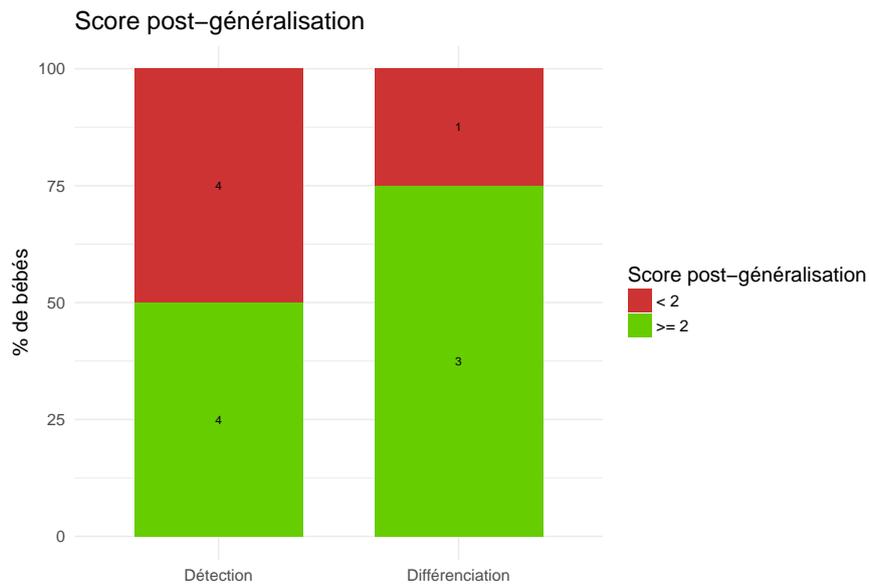


Figure 5.16 – Résultats en détection et en différenciation après le changement de contingence. Seuls les bébés avec $Score_{det} \geq 2$ avant le changement de contingence ont été inclus. En différenciation, seuls les bébés avec $Score_{det} \geq 2$ après le changement de contingence ont été inclus. Les chiffres indiqués correspondent au nombre de bébés dans chaque groupe.

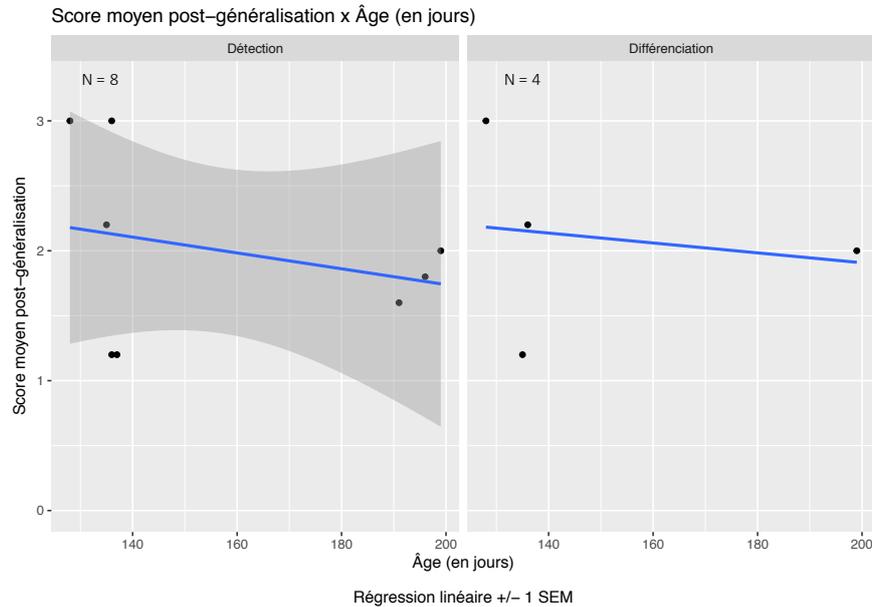


Figure 5.17 – Régressions linéaires du score de détection et du score de différenciation après le changement de contingence en fonction de l'âge en jours. Seuls les bébés avec $Score_{det} \geq 2$ avant le changement de contingence ont été inclus. En différenciation, seuls les bébés avec $Score_{det} \geq 2$ après le changement de contingence ont été inclus. Les chiffres indiqués correspondent au nombre de bébés dans chaque groupe.

Conclusion. Les performances que nous observons après le changement de contingence sont comparables à celles que nous obtenons pour l'exposition initiale à une contingence : la moitié des bébés semble capable de détecter la contingence et parmi ces bébés, 80% d'entre eux semblent capables de la différencier. Nous n'observons pas d'influence de l'âge sur ces résultats. Ces résultats suggèrent que l'apprentissage montré par la moitié des bébés après le changement de contingence pourrait ne pas être la marque d'une généralisation d'un apprentissage, mais simplement de l'apprentissage d'une nouvelle contingence.

4.3 Méthodes de mesure de l'apprentissage

Nous traitons dans cette section la dernière catégorie de question : les méthodes de mesure de l'apprentissage d'une contingence sensorimotrice chez le bébé.

4.3.1 La durée de la session d'apprentissage (avant que le bébé ne soit agité) est-elle un indicateur de l'apprentissage d'une contingence sensorimotrice ?

La dernière question que nous souhaitons investiguer est une question méthodologique. Comme nous le discuterons plus longuement en discussion de ce chapitre (Section 5), nous avons au cours de cette série d'études pilotes cherché à déterminer une mesure objective permettant de rendre

compte de la sensibilité aux contingences sensorimotrices chez les bébés de moins d'un an. Nous avons ici cherché à savoir si la durée de l'expérience (pour rappel nos expériences n'avaient pas une durée fixe mais continuaient jusqu'à ce que le bébé soit agité) pouvait être une mesure prédictive du score de détection et de différenciation des bébés. Pour cela nous avons effectué pour la détection et la différenciation des corrélations (méthode de type Kendall) et des régressions linéaires des scores moyens en fonction de la durée de l'expérience — ces analyses ont été réalisées chez les bébés rencontrés au laboratoire uniquement.

Détection. Nous avons obtenu une corrélation positive et significative ($\tau = 0.35$, $p < .001$), ainsi qu'un modèle significatif ($F(1, 85) = 22.1$, $p < .001$) avec $R^2 = .197$ (Figure 5.18).

Différenciation. Pour les 32 bébés avec $Score_{det} \geq 2$, nous avons obtenu une corrélation positive mais faible et non-significative ($\tau = 0.11$, $p = .442$) et un modèle non-significatif ($\chi^2(1) = .087$, $p = .768$) (Figure 5.18).

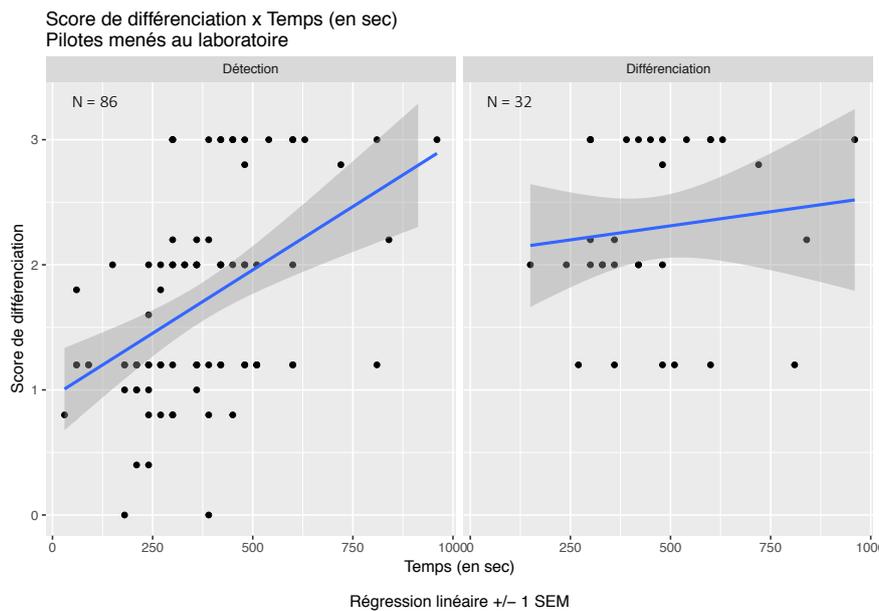


Figure 5.18 – Régressions linéaires en détection et en différenciation du score en fonction de la durée de l'étude. Les analyses portent sur le premier essai des bébés testés au laboratoire. En différenciation, seuls les bébés avec $Score_{det} \geq 2$ ont été inclus.

Conclusion. Ce résultat suggère que la durée de l'expérience pourrait être une mesure pertinente pour déterminer si un bébé a ou non détecté une contingence. Pour les bébés ayant détecté une contingence, la durée de l'expérience ne permet pas de déterminer si les bébés ont ou non différencié celle-ci.

5 Discussion

Le premier message à retenir de cette série de douze études pilotes est que la sensibilité aux contingences sensorimotrices chez le bébé âgé de moins d'un an est un phénomène complexe à étudier. Nous avons en effet eu besoin de tester plus d'une centaine de bébés à travers douze études différentes (sans compter l'étude présentée au [Chapitre 4](#)) afin de mettre en place un protocole expérimental exploitable en laboratoire et pour lequel des bébés âgés de moins d'un an montraient des signes clairs de sensibilité à la contingence impliquée. Nous suggérons une analyse de ce constat dans le contexte de la littérature en psychologie du développement en discussion générale ([Section 2](#)). Nous proposons pour l'instant de passer en revue les conclusions et les pistes de discussion apportées par cette série d'études pilotes.

5.1 Capacités de détection et de différenciation d'une contingence sensorimotrice

Le premier point de discussion que nous souhaitons aborder concerne les capacités de détection et de différenciation montrées par les bébés dans nos études. Toutes études pilotes confondues, nous observons qu'en moyenne un bébé sur deux (49%) a été capable de détecter la contingence impliquée dans la tâche ($Score_{det} \geq 2$). Les analyses menées nous ont permis d'identifier deux facteurs semblant influencer la capacité des bébés à détecter une contingence : la nombre de sessions d'apprentissage et la saillance de l'action, ce qui est encore avec la revue de la littérature présentée au [Chapitre 1](#). Parmi les bébés ayant détecté la contingence impliquée dans la tâche, nous observons que la majorité d'entre eux (80%) ont été capables de différencier le bras « connecté » ($Score_{dif} \geq 2$). Les résultats de nos analyses suggèrent que l'âge aurait une influence sur la capacité de différenciation des bébés, ce qui est en accord avec notre hypothèse selon laquelle le savoir-faire corporel du bébé se développe au cours de la première année de vie en allant du global au local (voir [Section 1](#) du [Chapitre 4](#)). Nous notons aussi — même si cela reste plus anecdotique — que cette amélioration de la capacité de différenciation avec l'âge semble s'observer pour les contingences proximales, mais non pour les contingences distales. Ce second résultat est en accord l'hypothèse selon laquelle les bébés explorent préférentiellement les contingences permettant un gain de connaissances ou de compétences (motivation intrinsèque, voir la [Section 2.2](#) de l'introduction générale), ce qui se traduit ici par un intérêt pour les contingences dont les paramètres spatiaux sont proches de celles impliquant la manipulation d'objets, capacité que les bébés sont en train d'affiner entre 3 et 9 mois. Nous envisageons dans le futur de vérifier cette hypothèse en comparant la sensibilité des bébés à trois contingences différentes : (i) une contingence distale : le bébé porte des bracelets aux poignets et deux lumières placées devant lui s'allument lorsqu'il secoue les bras, (ii) une contingence proximale sans manipulation : le bébé porte des

bracelets aux poignets et les bracelets s'allument lorsque celui-ci secoue les bras (similaire au Pilote L, voir [Section 3.3.6](#)) et (iii) une contingence proximale avec manipulation : les bracelets sont attachés à l'intérieur des paumes du bébés, de sorte à ce que le bébé « tienne » un bracelet dans chaque main et que les bracelets s'allument lorsque le bébé secoue les bras (comparable à un hochet). L'idée serait alors de comparer la sensibilité à ces trois contingences de bébés du même âge mais ayant déjà acquis ou non la capacité de prise d'objets.

5.2 Capacités de transfert et de généralisation

Le second point de discussion que nous souhaitons aborder ici concerne les capacités des bébés à transférer l'apprentissage d'une contingence d'un bras à l'autre bras et à généraliser l'apprentissage d'une contingence à une autre contingence.

Relativement à la capacité de transfert, nos résultats suggèrent que celle-ci ne serait pas encore parfaitement établie chez les jeunes bébés (ici, 4 mois). Cette absence de transfert chez les jeunes bébés pourrait potentiellement s'expliquer par les faibles capacités d'inhibition motrice observées chez le bébé durant les premiers mois de vie ([D'Souza et al., 2016](#); [Kato et al., 2013](#); [Watanabe et al., 2011](#)). Par exemple, [Timmons \(1994\)](#) a montré que des bébés de 6 mois exposés durant 2 jours à une contingence entre les mouvements d'un de leur bras (ou une de leurs jambes) et une stimulation audiovisuelle, puis 3 jours après, exposés durant 2 jours à une contingence entre les mouvements de la jambe ipsilatérale (respectivement du bras) et la même ou une autre stimulation audiovisuelle montraient après le transfert une activité motrice du membre précédemment « connecté » similaire à celle du nouveau membre « connecté ». De notre côté, le codage vidéo des sessions d'apprentissage d'un bébé exposé quotidiennement pendant plusieurs semaines entre l'âge de 4 mois et 5 mois et demi à une contingence entre les mouvements de l'un de ses bras et une stimulation audiovisuelle et localisée sur le bras « connecté » (comparable à un hochet) — données non présentées ici — nous a permis d'observer que celui-ci continuait à réaliser des mouvements du bras précédemment « connecté » après le transfert, tout en dirigeant son regard vers le bras nouvellement « connecté ». Il est alors intéressant de relever que cette situation semblait particulièrement frustrante pour le bébé (pleurs, énervement, cris, etc.), ce qui suggère que le bébé aurait eu l'intention de bouger le bras nouvellement « connecté » mais que son système moteur et son système inhibiteur ne lui auraient pas permis de réaliser ce mouvement. Cependant, il convient de noter que les deux seules autres études de la littérature réalisée sur le sujet (à notre connaissance) suggèrent que les bébés dès l'âge de 3 mois possèdent la capacité de transférer l'apprentissage d'une contingence d'un membre à un autre ([Rovee-Collier et al., 1978](#); [Watanabe & Taga, 2009](#)). Il est intéressant de noter que dans ces études la différenciation observée est entre les bras et les jambes et non entre les deux bras ou les deux jambes, ce qui suggère que le transfert est plus facile dans les situations où l'inhibition nécessaire à l'arrêt des mouvements du membre anciennement

« connecté » est peu élevée (transfert entre membres distants) que dans les situations où celle-ci est forte (transfert entre membres proches au niveau moteur, proprioceptif et visuel).

En ce qui concerne la capacité des bébés à généraliser leur apprentissage d'une contingence à une nouvelle contingence, les résultats obtenus suggèrent que l'apprentissage d'une contingence chez les bébés âgés de moins de 9 mois pourrait être « spécifique à la tâche », faisant les bébés de cet âge ne pourraient pas mettre à profit l'apprentissage d'une contingence dans une situation légèrement différente (changement de stimulation audiovisuelle ici). Ce résultat est en accord avec la littérature sur le sujet, montrant que les bébés jusqu'à l'âge de 9 mois ne semblent pas capables de généraliser l'apprentissage d'une contingence à une autre contingence dès lors que le retour perceptif ou le contexte est modifié (voir [Chapitre 2](#) et [Rovee-Collier, 1999](#), pour une revue de la littérature).

5.3 Méthodes de mesure de l'apprentissage

Le troisième volet de discussion que nous souhaitons aborder est un point méthodologique. Nous avons pour cette série d'études pilotes créé une grille de cotation des comportements des bébés. Cette grille avait été mise en place pour répondre aux limites de l'analyse utilisée pour l'étude présentée au [Chapitre 4](#). Nous reviendrons plus en détails sur les limites des méthodes de mesure en [Section 2](#) de la discussion générale. Nous présentons ici deux constats révélés par l'analyse vidéo qui nous semblent essentiels à prendre en compte pour définir une méthode de mesure de la sensibilité aux contingences sensorimotrices chez le bébé âgé de moins d'un an :

- Les bébés ne sont pas « impliqués dans la tâche » durant la totalité de la session d'apprentissage. Nous observons chez la majorité des bébés une alternance entre exploration de la contingence utilisée dans l'expérience (parfois durant moins d'une minute) et exploration des nombreuses autres contingences à découvrir dans l'environnement (comme par ex. la manipulation des chaussures).
- Les dynamiques de détection et de différenciation d'une contingence varient très fortement d'un bébé à l'autre. Ainsi, certains bébés semblent réaliser par hasard le mouvement contingent précis (ici un mouvement du bras « connecté » seul) dès la première occurrence de la contingence et continuent alors à exploiter ce mouvement durant le reste de la session. A l'inverse, d'autres bébés découvrent au départ la contingence à travers un mouvement n'impliquant pas uniquement le bras « connecté ». Certains de ces bébés semblent alors continuer à exploiter ce mouvement qui permet de déclencher la stimulation audiovisuelle sans sembler « chercher à trouver le bon mouvement », présentant ainsi un comportement que l'on pourrait qualifier de superstitieux. D'autres bébés semblent eux explorer leur répertoire moteur et progressivement affiner la contingence en réalisant des mouvements du bras

« connecté » seul. Chez d'autres bébés encore, nous observons que le mouvement « identifié » comme contingent varie au cours de la session et cela que la première occurrence de la contingence ait été ou non causée par un mouvement du bras « connecté » seul.

Si l'analyse vidéo permet de composer avec ces différences interindividuelles, celle-ci est trop coûteuse en temps et trop sujette aux erreurs humaines pour être utilisée comme méthode d'analyse. Quelle méthode de mesure faut-il alors utiliser pour rendre compte des différences interindividuelles relevées ci-dessus ? Nous proposons suite à cette série d'études pilotes qu'un ensemble de mesures convergentes serait le meilleur moyen de conclure avec assurance qu'un bébé a détecté une contingence. Nous présentons ces méthodes de mesure en discussion générale (Section 2). Les analyses réalisées ci-dessus nous ont permis d'identifier un premier critère, la durée de l'expérience (pour rappel, dans nos expériences, la durée de l'expérience n'est pas fixe : l'expérience continue tant que le bébé ne présente pas de signes de mécontentement), qui pourrait permettre de classer les bébés entre ceux ayant détecté et ceux n'ayant pas détecté la contingence. Néanmoins, ce critère ne semble pas être applicable à la différenciation de la contingence.

Discussion générale

Notre discussion générale est organisée en quatre temps. Une première partie synthétise les conclusions apportées par nos travaux. Une deuxième discute les limites méthodologiques et théoriques rencontrées au cours de cette thèse. Une troisième partie offre des perspectives d’application de nos travaux à la robotique du développement. Et une dernière section propose d’ouvrir nos réflexions en questionnant les capacités mises en jeu par le bébé lorsque celui-ci « apprend » une contingence sensorimotrice.

1 Questions de recherche et réponses apportées

L’objectif de cette thèse était d’enrichir notre compréhension de la sensibilité aux contingences sensorimotrices et de son rôle dans le développement du savoir-faire corporel chez le bébé âgé de moins d’un an. Nous reprenons dans les paragraphes ci-dessous ([Section 1.1](#) et [Section 1.2](#)) les quatre questions de recherche établies en introduction et résumons pour chacune d’elles les réponses apportées dans le cadre de cette thèse.

1.1 Sensibilité aux contingences sensorimotrices chez le bébé

Quels sont les paramètres qui facilitent ou empêchent la détection d’une contingence sensorimotrice chez le bébé âgé de moins d’un an ? La revue de la littérature présentée au [Chapitre 1](#) et les études pilotes présentées au [Chapitre 5](#) ont permis d’identifier certains des paramètres qui facilitent ou empêchent la détection d’une contingence et de les regrouper en trois catégories : ceux liés à la contingence, ceux liés aux conditions d’exposition et ceux liés au bébé et à son environnement socio-culturel. Nous ne reprenons pas ici le détail de ces paramètres (voir la [Section 6](#) du [Chapitre 1](#) pour une liste), mais proposons une conclusion plus générale au vu des résultats de nos études expérimentales. Le message à retenir de cette revue — s’il ne devait y en avoir qu’un seul — est que la sensibilité aux contingences sensorimotrices chez le bébé âgé de moins d’un an est un phénomène complexe. La sensibilité d’un bébé à une contingence donnée ne semble pas dépendre simplement de la nature de cette contingence, des conditions d’exposition à celle-ci ou des caractéristiques du bébé et de son environnement, mais de l’interaction entre

ces trois domaines. Cela engendre, d'une part, des différences inter-individuelles : tous les bébés ne semblent pas sensibles aux mêmes contingences ni aux mêmes contextes d'exposition à une contingence et, d'autre part, des différences intra-individuelles : un même bébé ne semble pas sensible aux mêmes contingences ni aux mêmes contextes d'exposition à une contingence au cours de son développement. Nous pouvons supposer que de telles variations dans la sensibilité aux contingences sensorimotrices d'un même bébé s'observent aussi d'un jour à l'autre ou d'un moment à l'autre de la journée. Nous ajoutons à cette conclusion, qu'en plus d'être complexe, la sensibilité aux contingences chez le bébé âgé de moins d'un an est encore mal comprise. En effet, si de nombreux travaux rendent compte de l'influence d'un paramètre sur la sensibilité aux contingences sensorimotrices (voir par ex. Dunham & Dunham, 1990; Kraebel et al., 2004), rares sont les travaux portant sur l'interaction entre plusieurs paramètres (par ex. Rochat & Striano, 1999, pour une interaction entre le paramètre relationnel de la contingence et l'âge des bébés). Nous soutenons donc que l'étude de la sensibilité aux contingences mérite un renouveau d'intérêt en psychologie du développement, d'autant plus à l'heure où ces connaissances sont aussi utiles aux roboticiens du développement.

Dans quelle mesure l'exploitation de la sensibilité aux contingences sensorimotrices contribue-t-elle au développement du bébé ? Les éléments de réponse à cette question sont apportés par la revue de la littérature croisée entre la psychologie du développement et la robotique présentée au **Chapitre 2**. Nous avons mis en évidence quatre exemples de contribution de l'exploitation de la sensibilité aux contingences dans le développement: (i) la discrimination de l'action ou du membre impliqués dans une contingence sensorimotrice, qui permet au bébé d'acquérir de nouvelles compétences motrices et de développer son savoir-faire corporel, (ii) la mémorisation d'une contingence sensorimotrice, qui permet au bébé de mobiliser à nouveau des compétences précédemment acquises, (iii) la généralisation d'une contingence à une nouvelle situation, qui permet au bébé d'appliquer des compétences acquises dans une certaine situation à de nouvelles situations jamais rencontrées auparavant et (iv) l'utilisation d'une contingence sensorimotrice dans une action dirigée vers un but, qui permet au bébé d'atteindre une situation désirée par la réalisation d'actions adéquates. L'illustration offerte par ces quatre exemples chez le bébé, et le parallèle avec la robotique établi pour chacun de ces exemples, permettent de dessiner une conclusion plus générale : l'exploitation de la sensibilité aux contingences sensorimotrices contribue au développement en tant que « catalyseur » des apprentissages en offrant au bébé la possibilité de tirer bénéfice de chaque interaction avec son environnement. Par conséquent, nous proposons que la complexité de la sensibilité du bébé aux contingences sensorimotrices (évoquée ci-avant) ne devrait pas être considérée comme une limite qui empêcherait le bébé de tirer profit de la richesse des interactions avec son environnement physique et social, mais au contraire comme un atout qui permet au bébé de filtrer les informations pertinentes pour son apprentissage. En effet, comment

le bébé pourrait-il bénéficier de ses interactions avec le monde qui l'entoure s'il détectait à chaque instant toutes les contingences sensorimotrices auxquelles il est exposé ? L'illustration du rôle dans la sensibilité aux contingences sensorimotrices, à la fois en psychologie et en robotique du développement, démontre à nouveau la nécessité de mieux caractériser celle-ci chez le jeune bébé.

1.2 Développement du savoir-faire corporel

Comment le savoir-faire corporel se développe-t-il durant la première année de vie du bébé ? La revue de la littérature présentée au [Chapitre 3](#) aborde cette question. Celle-ci suggère que (a) le développement du savoir-faire corporel est sous-tendu par l'exploitation de la sensibilité aux contingences sensorimotrices et la motivation intrinsèque (ce que nous avons aussi montré au [Chapitre 2](#), voir (i) ci-dessus) et (b) le développement du savoir-faire corporel se réalise par l'exploration du corps, l'interaction avec l'environnement physique et l'environnement social. Cette revue de la littérature a mis en exergue l'intérêt de défendre une vision holistique des apprentissages sensorimoteurs du bébé et d'étudier le développement des compétences corporelles du bébé sous l'étiquette d'un même domaine de développement. En parallèle de son intérêt pour la communauté scientifique, nous espérons que cette revue bénéficiera à un lectorat dans le domaine de la petite enfance en France, celle-ci ayant été expressément rédigée en français dans cette optique. Nous souhaitons par cet article sensibiliser les professionnel.le.s de la petite enfance aux faits que (i) les bébés possèdent un savoir-faire corporel riche bien avant de se reconnaître dans le miroir (les signes de reconnaissance apparaissant vers l'âge de 18 mois), (ii) le développement corporel du bébé ne débute pas uniquement vers l'âge de 3 - 5 mois par l'exploration manuelle des jouets, mais s'observe *in utero* et dès les premiers jours de vie *post-partum* par une exploration du corps et (iii) l'interaction avec les partenaires sociaux joue aussi un rôle primordial (même si moins évident à première vue) dans le développement corporel du bébé. Nous espérons que la diffusion de cet article permettra une meilleure connaissance et prise en compte dans le milieu de la petite enfance des compétences corporelles précoces du bébé et du rôle de l'exploration spontanée dans leur acquisition.

Le développement du savoir-faire corporel se réalise-t-il par le passage d'une utilisation indifférenciée (globale) du corps à une utilisation différenciée (locale) ? Cette question a fait l'objet des deux études expérimentales présentées au [Chapitre 4](#) et au [Chapitre 5](#). La première conclusion, offerte par l'étude présentée au [Chapitre 4](#), est que les bébés présentent entre l'âge de 4 et de 8 mois des signes d'une utilisation différenciée d'un de leurs bras lorsque les mouvements de ce bras sont à l'origine de l'apparition d'une stimulation audiovisuelle. Contrairement à notre hypothèse, cette étude n'a pas montré d'évolution de l'utilisation différenciée du corps au cours du développement. Nous supposons cependant que cette absence d'effet de l'âge

pourrait s'expliquer par l'incapacité de notre dispositif expérimental à le mesurer, et non par une réelle absence d'évolution du savoir-faire corporel au cours des premiers mois de la vie du bébé (voir la [Section 4](#) du [Chapitre 4](#)). La seconde conclusion se dessinant à la lecture des résultats des douze études pilotes que nous avons menées (voir [Chapitre 5](#)) est que les bébés présentent de très grandes différences inter-individuelles dans leurs comportements durant l'exposition à une contingence sensorimotrice, aussi bien dans leur capacité à détecter celle-ci que dans leur capacité à montrer une différenciation du membre impliqué dans cette contingence. Une fois encore, nous soutenons l'idée que de nouveaux travaux devraient être menés afin de mieux comprendre la sensibilité des bébés aux contingences sensorimotrices ainsi que l'exploitation de celle-ci dans le développement du savoir-faire corporel. C'est dans cette optique que notre équipe mène actuellement une nouvelle étude chez le bébé âgé de 6 mois, dont l'objectif est de définir et tester une méthode inédite d'analyse de la sensibilité aux contingences sensorimotrices chez le bébé (voir détails ci-après, [Section 2.1.3](#)).

2 Limites méthodologiques et théoriques

Nous souhaitons dans cette section explorer les limites méthodologiques et théoriques que nous avons rencontrées dans notre étude bibliographique et expérimentale de la sensibilité aux contingences sensorimotrices et du développement du savoir-faire corporel chez le bébé âgé de moins d'un an. Nous questionnons successivement les méthodes de mesure de la sensibilité aux contingences sensorimotrices, les enjeux de la reproductibilité des études sur la sensibilité aux contingences sensorimotrices et les méthodes de mesure du savoir-faire corporel.

2.1 Limites de méthodes de mesure de la sensibilité aux contingences sensorimotrices

Quelles sont les preuves comportementales qu'un bébé a détecté une contingence ? Cette question, qui comme nous le verrons a aussi été traitée dans la littérature, a animé de nombreux débats au sein de notre équipe au cours de ces trois années de thèse. Nous proposons ci-dessous un compte-rendu du cheminement de nos réflexions et la meilleure réponse que nous avons déterminée jusqu'alors.

2.1.1 Critères d'apprentissage utilisés dans la littérature

Plusieurs « critères d'apprentissage » ont été utilisés dans la littérature, tous fondés sur l'hypothèse que lorsqu'un bébé est sensible à une contingence, celui-ci augmente la fréquence de répétition de l'action impliquée dans cette contingence, en comparaison avec son activité spontanée mesurée durant une phase de niveau de base. Parmi ces différents critères nous pouvons citer par exemple

le calcul de la différence entre l'activité du bébé durant la phase d'exposition à la contingence et durant la phase de niveau de base (Lemelin et al., 2002) ou l'utilisation d'un outil probabiliste, permettant de déterminer dans quelle mesure les différences d'activité observées entre l'exposition à la contingence et la phase de niveau de base sont la marque d'une détection de la contingence (Watson, 1984). Un critère se détache des autres par la fréquence (élevée) de son utilisation : celui développé par l'équipe de Carolyn Rovee-Collier. Ce critère d'apprentissage a été employé pour la première fois dans une étude de 1984 utilisant le paradigme du mobile pour étudier les capacités mnésiques des bébés à l'âge de 3 mois (Fagen et al., 1984). Dans cette étude, les bébés étaient exposés à une première phase de niveau de base de 3 minutes, puis à une phase d'acquisition de la contingence de 9 minutes, séparée en trois périodes de 3 minutes pour les analyses. Pour chacune des quatre périodes de 3 minutes de l'expérience, le taux de réponse (nombre de coups de pied réalisés avec la jambe « connectée » par minute) montré par le bébé était calculé. Les auteurs ont alors établi le critère suivant : un bébé a appris la contingence entre ses mouvements et les mouvements du mobile lorsque celui-ci a présenté durant 2 minutes d'une des trois périodes de 3 minutes de la phase d'acquisition un taux de réponse 1.5 fois supérieur à son taux de réponse durant la phase de niveau de base. Après la publication de cet article, ce critère a été massivement adopté par la communauté en psychologie du développement, premièrement dans la majorité des articles de l'équipe de Rovee-Collier (par ex. Greco et al., 1986; Hartshorn & Rovee-Collier, 1997; Cuevas et al., 2016), mais aussi dans des articles d'autres équipes utilisant le paradigme du mobile (par ex. Kraebel et al., 2004; Taylor et al., 2013) ou un autre paradigme (par ex. Angulo-Barroso et al., 2017). Ce critère, sur lequel se base un grand nombre de nos connaissances sur la sensibilité aux contingence sensorimotrices chez le bébé, n'a depuis été que très rarement remis en question — voir cependant l'article particulièrement bien documenté de Malcuit et al. (1988) sur le sujet, ou celui de Millar & Weir (2015), ou encore les travaux récents de Zaadnoordijk et al. (2018b).

Ce critère est selon nous problématique, premièrement par sa définition même. Pourquoi un ratio de 1.5 entre le niveau de base et l'acquisition, et non pas un ratio de 1.2 (comme employé par ex. par Watanabe & Taga, 2006) ? Pourquoi 2 minutes consécutives, et non pas 30 secondes ou 3 minutes ? Pourquoi une seule des périodes de 3 minutes, et non deux périodes ? Le choix des paramètres de ce critère n'a pas été documenté dans l'article d'origine (Fagen et al., 1984) et semble ainsi avoir été réalisé de manière arbitraire (ou peut-être de sorte à faire ressortir dans les analyses l'augmentation de l'activité du bébé au cours de la session d'apprentissage observée subjectivement par les expérimentateurs). De plus, ce critère privilégie par sa définition les bébés étant très peu actifs durant la phase de niveau de base. Un bébé très calme, qui n'aurait par exemple réalisé qu'un seul coup de pied durant la phase de niveau de base, devrait uniquement réaliser deux coups de pieds pour atteindre le critère. Plusieurs études ont rapporté un nombre significativement plus élevé de bébés montrant un apprentissage de la contingence (selon ce critère) chez les bébés

présentant une activité en phase de niveau de base « basse » ou « modérée » que chez les bébés ayant une activité en niveau de base « haute » (voir par ex. [Watanabe & Taga, 2011](#); [Millar & Weir, 2015](#)). Une telle différence peut avoir des conséquences sur l'interprétation des données, comme illustré par [Graf et al. \(2012\)](#), qui ont noté dans leur étude que la différence d'apprentissage qu'ils observaient entre deux groupes de bébés âgés de 3 mois testés avec le paradigme du mobile (un groupe de bébés Allemands et un groupe de bébés Camerounais) pouvait être simplement expliquée par une différence de niveau de base, sans qu'il n'y ait de différence comportementale entre les deux groupes durant la phase d'exposition à la contingence. Des critiques plus détaillées de cette influence du taux d'activité durant la phase de niveau de base ont été proposées par [Millar & Weir \(2015\)](#) et [Malcuit et al. \(1988\)](#).

En plus de ce problème de définition, ce critère pose selon nous trois obstacles à l'étude de la sensibilité aux contingences sensorimotrices : (i) il dispense les expérimentateurs de réaliser un groupe contrôle dans leurs études (par ex. [Angulo-Barroso et al., 2017](#)), (ii) il légitime la non-inclusion dans les analyses des bébés ne se conformant pas à l'hypothèse d'une augmentation de l'activité au cours de la session d'apprentissage, sans que cela ne soit explicitement mentionné dans les conclusions de l'article (par ex. [Watanabe & Taga, 2009](#)) et (iii) il ne reflète pas la diversité des réponses comportementales des bébés durant l'exposition à une contingence. Les deux premiers problèmes sont discutés dans la [Section 2.3](#) ci-après. Nous nous intéressons dans les paragraphes suivants au troisième problème : la diversité des réponses comportementales des bébés durant l'exposition à une contingence.

2.1.2 Diversité des réponses comportementales

L'utilisation du critère présenté ci-dessus repose sur l'hypothèse suivante : un bébé, lorsqu'il a détecté une contingence, répète l'action contingente durant plusieurs minutes. Mais cette hypothèse est-elle valide ? Les résultats présentés dans la littérature suggèrent que oui, comme l'illustrent les représentations graphiques de la réponse comportementale des bébés en fonction du temps (voir [Figure D.1](#) ou notre étude présentée au [Chapitre 4](#)). On note en effet que, dans la majorité des travaux, le nombre d'occurrence de l'action contingente (ou l'activité motrice du membre « connecté ») augmente au cours du temps (par ex. [Greco et al., 1986](#); [Watanabe & Taga, 2006](#)). Cependant, les résultats présentés dans la littérature correspondent fréquemment aux données des bébés sélectionnés car ayant appris la contingence et donc montrant par définition ce type d'activité (par ex. les deux mêmes études). De plus, ces courbes, à l'instar de celles du [Chapitre 4](#), représentent généralement la moyenne de l'activité de l'ensemble des bébés ayant participé à l'étude (par ex. les deux mêmes études), et non des données individuelles.

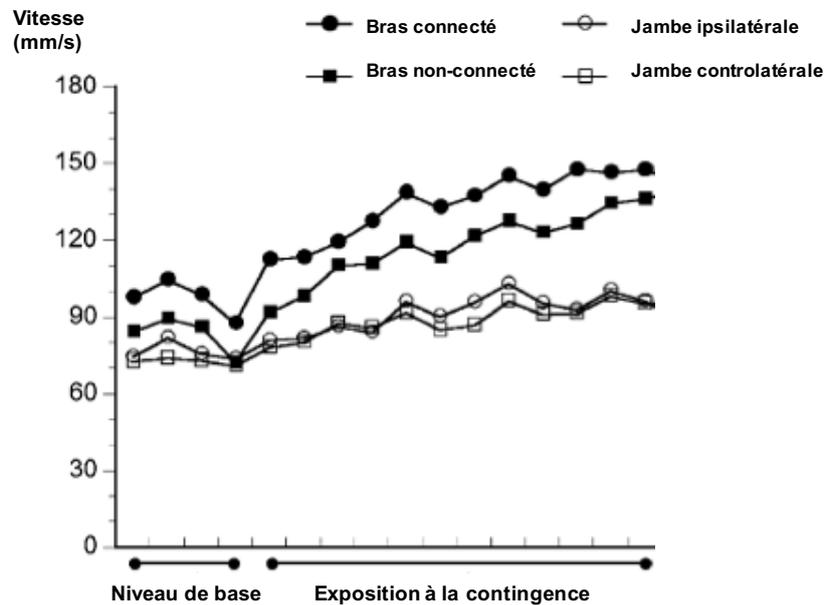


Figure D.1 – Exemple de représentation graphique de la réponse comportementale des bébés en fonction du temps, ici la vitesse moyenne de chaque membre en millimètres par seconde, chaque point représente l'activité moyenne de 16 bébés âgés de 3 mois durant 30 secondes — figure librement adaptée de [Watanabe & Taga \(2006\)](#).

Mais les bébés adoptent-ils tous un même comportement lors de la détection d'une contingence ? Les erreurs standards rapportées dans la littérature sont souvent élevées, ce qui suggère que les bébés présentent de fortes variations inter-individuelles (voir par ex. [Heathcock et al., 2005](#); [Merz et al., 2017](#), ou notre étude présentée au [Chapitre 4](#)). Ce constat est aussi soutenu par notre analyse du comportement de 98 bébés, réalisée dans le cadre de l'étude présentée au [Chapitre 5](#), et rapportant des comportements très variés chez les bébés durant l'exposition à une contingence sensorimotrice. Nous mettons en relief dans le paragraphe suivant les différences entre les postulats sur lesquels se base le critère d'apprentissage utilisé dans la littérature et les comportements observés chez les bébés durant nos études. A noter que ces comportements restent anecdotiques et n'ont pas fait l'objet d'une analyse.

- *Postulat n°1 : tous les bébés sont motivés à explorer la contingence impliquée dans la tâche.*
→ Réalité : les bébés ne semblent pas tous particulièrement intéressés à explorer la contingence impliquée dans notre tâche. Nous avons en effet noté qu'une partie des bébés étaient plus intéressés à jouer avec leurs chaussures, regarder leur parent ou n'importe quel autre objet du box expérimental. Certains bébés, qui semblaient au départ très intéressés par l'exploration de la contingence, s'en lassent parfois subitement et se tournent vers d'autres

aspects de leur environnement ou se mettent à pleurer.

- *Postulat n°2 : chez tous les bébés, cette motivation se traduit par une répétition de l'action contingente.*

→ Réalité : Certains bébés dévoilent leur sensibilité à la contingence non pas à travers plusieurs répétitions successives du mouvement contingent, mais par une exécution du mouvement contingent sans répétition immédiate de celui-ci, et cela de manière sporadique au cours de la session d'apprentissage (parfois à de nombreuses reprises, mais parfois seulement deux ou trois fois durant toute la session).

- *Postulat n°3 : tous les bébés maintiennent cette réponse comportementale pendant une longue période de temps.*

→ Réalité : Parmi les bébés dont la sensibilité à la contingence se traduit par une répétition de l'action contingente, certains bébés ne présentent pas ce comportement de manière soutenue durant la totalité de la session d'apprentissage, ni même parfois pendant 1 ou 2 minutes consécutives. Certains bébés alternent par exemple entre 20 secondes de répétition de l'action contingente et 20 secondes d'exploration de leurs chaussures, puis restent calmes durant 1 minute.

Ainsi, tous les bébés ne semblent pas montrer le comportement optimal supposé par l'utilisation du critère d'apprentissage employé dans la littérature (voir section précédente, [Section 2.1.1](#)). Nous observons au contraire de fortes variations inter-individuelles. Mais alors, quel critère utiliser afin de rendre compte de l'ensemble de la palette de comportements montrés par les bébés ?

2.1.3 Proposition d'une nouvelle méthode

Nous retraçons dans ce paragraphe la chronologie des réflexions nous ayant menés à la mise en place d'une nouvelle méthode, dont l'un des volets (grille de cotation) a déjà été présenté au [Chapitre 5](#).

Les discussions répétées au sein de notre équipe nous ont premièrement permis de conclure qu'un critère basé sur un seul type de comportement n'était pas suffisant : la détection de contingence ne semblant pas se traduire de la même manière chez tous les bébés, l'utilisation d'un seul type de mouvement restreindrait l'étude de la sensibilité à la contingence à ce seul type de comportements, ce qui nous en donnerait une vision biaisée. Nous avons alors essayé de déterminer plusieurs critères permettant de rendre compte de la sensibilité des bébés à une contingence. Nous avons pour cela sélectionné, sur la base subjective du visionnage d'enregistrements vidéo, les bébés de nos études pilotes pour lesquels nous étions tous d'accord sur le fait qu'ils avaient détecté la contingence — cas très rare ! Pour chaque bébé, nous avons alors cherché à répondre à la question suivante :

qu'est-ce qui nous donne le ressenti subjectif que ce bébé a détecté la contingence ? Nous avons déterminé les comportements sur lesquels nous basions notre ressenti, dont voici la liste :

- Le bébé réalise uniquement des mouvements du membre connecté.
- Le bébé anticipe l'apparition de la stimulation visuelle.
- Le bébé réalise des pauses entre deux explorations de la contingence.
- Le bébé « teste » l'effet des mouvements du membre non-connecté.
- Le bébé montre des signes de contentement (sourires, vocalisations, etc.) durant l'exploration de la contingence.

Dans le cas d'une contingence impliquant un seuil adaptatif (voir [Chapitre 5](#)) :

- Le bébé suit par ses mouvements l'augmentation progressive du seuil.
- Le bébé montre des signes de frustration (pleurs, cris, etc.) lorsque le seuil est trop haut.

Nous avons aussi ajouté qu'il était primordial afin de considérer un comportement comme signe d'une détection d'une contingence que celui-ci ne s'observe pas, ou du moins pas à la même fréquence, chez des bébés testés dans une situation contrôle.

A partir de cette liste de comportements, nous avons cherché à définir une méthodologie permettant de déterminer si un bébé a ou non détecté une contingence durant la session d'apprentissage. Nous avons alors défini une première méthode : une grille de cotation des comportements du bébé permettant de déterminer un score de détection et un score de différenciation pour chaque bébé (grille de cotation présentée au [Chapitre 5](#)). De plus, notre équipe a récemment entrepris de définir une seconde méthode de mesure, complémentaire à la grille de cotation, et s'appuyant sur l'analyse des données d'accélération des bras du bébé durant la session d'apprentissage. Cette seconde méthode consiste en un modèle probabiliste inspiré des travaux de [Watson \(1984\)](#). Ce modèle probabiliste est actuellement en cours d'élaboration par Sergiu T. Popescu et Alice Dauphin¹. Il sera utilisé pour l'analyse des données récoltées dans l'étude menée par notre équipe suite à la série d'études pilotes présentée au [Chapitre 5](#).

¹Une première version de ce modèle probabiliste inspiré des travaux de [Watson \(1984\)](#) a été développée et testée par Alice Dauphin dans le cadre d'un mémoire de master 2.

2.2 Enjeux de la reproductibilité des études sur la sensibilité aux contingences sensorimotrices

2.2.1 Limites des méthodes de recherche en psychologie du développement

Nous souhaitons dans ce paragraphe revenir brièvement sur la « crise de la reproductibilité » (*reproduction crisis*) que nous avons évoquée au [Chapitre 1](#). Cette crise, qui touche particulièrement les sciences sociales et la psychologie, a été mise en exergue par la publication en 2015 d'une tentative de répliation à large échelle de 100 résultats publiés dans des journaux réputés en psychologie et montrant que moins de la moitié des répliations avaient été concluantes ([Collaboration., 2015](#)). Cette remise en question de la méthodologie de recherche n'a pas épargné la psychologie du développement ([Frank et al., 2017](#); [Peterson, 2016](#)). Ce domaine est en effet particulièrement vulnérable aux faux-positifs, ce qui s'explique par la dualité entre les difficultés expérimentales inhérentes au domaine (petit nombre de bébés inclus dans chaque étude, absence de réponses explicites de la part des bébés, instabilité des comportements durant les études et une « course à publication », fruit d'un milieu compétitif dans lequel les résultats négatifs sont difficilement publiables, voir [Frank et al. \(2017\)](#); [Peterson \(2016\)](#)). [Peterson \(2016\)](#) a montré comment cette dualité pourrait pousser certains expérimentateurs — de manière consciente ou non — à produire plus qu'à obtenir des résultats significatifs. Parmi les problèmes dénoncés par [Peterson \(2016\)](#), nous souhaitons ici en relever trois : (1) la taille des articles dans le domaine ne permettant de décrire en détail les protocoles expérimentaux, certaines « astuces » ne seraient pas publiées, alors mêmes que celles-ci peuvent s'avérer décisives dans l'obtention d'un effet significatif, (2) certaines équipes de recherche présenteraient dans leurs publications uniquement la version d'un protocole pour laquelle des effets significatifs ont été obtenus, sans mentionner les versions préalables ayant été nécessaires à la mise en place du protocole final, et (3) les résultats négatifs n'étant que très difficilement publiables dans le domaine, certains chercheurs abandonneraient les protocoles ne donnant pas de résultats significatifs et ne publieraient pas les échecs de répliation de protocoles déjà existants ; ces protocoles dont les résultats n'ont pas été répliqués seraient alors considérés dans la communauté comme « fragiles » ou « difficiles à mettre en place », sans que cette considération ne prenne la forme d'une connaissance formalisée, publiée et donc accessible.

L'analyse commune de ces trois problèmes suggère que certains des effets observés en psychologie du développement pourraient avoir été obtenus au prix de nombreux efforts et pourraient ainsi être très dépendants de la tâche et des analyses précises mises en place par les expérimentateurs au sein de leur équipe. Cela ne remet pas nécessairement en question la véracité des effets obtenus au sein de chaque étude, mais suggère que ceux-ci sont difficilement généralisables à d'autres situations expérimentales et ainsi difficilement répliables. En quelle mesure cette perspective s'applique-t-elle à l'étude de la sensibilité aux contingences sensorimotrices ?

2.2.2 Application à l'étude de la sensibilité aux contingences sensorimotrices

La détection de contingences sensorimotrices chez le bébé âgé de moins d'un an entre-t-elle dans la catégorie des effets difficilement répliquables ? Nous avançons ici que oui. Nous nous basons premièrement sur la difficulté que notre équipe a rencontrée dans la mise en place d'un protocole expérimental pour lequel des bébés âgés de 3 à 9 mois seraient capables de détecter une contingence sensorimotrice. Cette difficulté est illustrée par les résultats de la série d'études pilotes présentée au [Chapitre 5](#). Notre argumentation est aussi soutenue par les échecs ou difficultés de réplification rapportés par des collègues en psychologie du développement (communications personnelles avec quatre équipes de recherche), travaux qui n'ont malheureusement jamais été publiés. L'utilisation d'un paradigme de conditionnement opérant nous a ainsi été indiquée comme « risquée dans le cadre d'une thèse » ou tout simplement « préférable à éviter » (communications personnelles).

Nous pouvons maintenant chercher dans les articles utilisant le conditionnement opérant les raisons pouvant expliquer que certaines études aient rapporté des résultats significatifs là où d'autres n'ont pas obtenu d'effet. Il est nécessaire pour cela de revenir sur le « critère d'apprentissage » utilisé dans la littérature, dont nous avons présenté une critique à la [Section 2.1](#). L'utilisation de ce critère a pour première conséquence une sélection des sujets, faisant qu'uniquement les données des bébés ayant appris la contingence selon ce critère sont pris en compte dans les analyses. Les conclusions des études utilisant ce critère ne sont donc pas représentatives de la population générale, mais de la partie des bébés sélectionnés, ce qui peut correspondre à une faible part des bébés rencontrés: par exemple, 58% chez [Tiernan & Angulo-Barroso \(2008\)](#) (8 minutes d'exposition), 37% chez [Sullivan & Lewis \(2003\)](#) (4 minutes d'exposition) ou encore 48% chez [Watanabe & Taga \(2009\)](#) (deux fois 4 minutes d'exposition). Une seconde conséquence de l'utilisation de ce critère est que de nombreux auteurs n'utilisent pas de groupe contrôle dans leurs études (par ex. [Angulo-Barroso et al., 2017](#); [Merz et al., 2017](#); [Watanabe & Taga, 2006](#)). Par exemple, si l'on considère les travaux de l'équipe de Rovee-Collier (qui constituent la plupart des travaux sur la sensibilité aux contingences), nous constatons que parmi les dix-neuf articles que nous avons examinés dans le cadre de cette thèse, seuls trois présentaient une condition contrôle avec une exposition aux mouvements d'un mobile non-contingent. On ne peut donc pas exclure la possibilité que les effets observés soient liés à d'autres facteurs que la détection de la contingence. Ainsi, pour conclure, nous suggérons que l'utilisation de ce critère facilite l'obtention de résultats significatifs, en permettant des analyses basées uniquement sur les performances des bébés ayant « réussi la tâche » et sans contrôle.

Une seconde explication est à chercher du côté des conditions expérimentales. Nous notons en effet que la majorité des études sur la sensibilité aux contingences sensorimotrices ont été réalisées à partir d'un nombre assez restreint de protocoles expérimentaux, principalement la succion non-nutritive et le paradigme du mobile. De plus, si nous prenons les travaux réalisés par l'équipe

de Rovee-Collier, il apparaît que leurs études ont été réalisées dans des conditions expérimentales bien précises, comme par exemple l'utilisation de modèles spécifiques de mobile, la réalisation des tests uniquement à domicile dans le lit des bébés (une manque de sensibilité des bébés ayant été notée au laboratoire, voir [Rovee-Collier et al. \(1978\)](#)), l'âge identique des bébés (majoritairement 3.5 mois, une difficulté à trouver des effets chez des bébés plus âgés ayant été rapportée, voir [Rovee-Collier et al. \(1981\)](#)) ou encore la réalisation d'études uniquement aux USA. Ces conditions jouent peut-être un rôle dans la capacité des bébés à répondre au conditionnement opérant, ce qui expliquerait que les effets observés ne soient pas facilement répliquables dans des études utilisant un autre paradigme, ou utilisant le paradigme du mobile mais dans des conditions expérimentales légèrement différentes.

Ainsi, nous suggérons que les résultats des études publiées actuellement, malgré leur intérêt significatif pour la psychologie du développement, ne permettent pas d'appréhender avec suffisamment de justesse la complexité de la sensibilité des bébés aux contingences sensorimotrices. Il est important de noter ici que cette suggestion n'est absolument pas une critique de ces études, dont l'objet n'était d'ailleurs que très rarement l'étude de la détection de contingences, et que ne nous remettons pas en question la rigueur de réalisation de celles-ci. Nous soutenons uniquement que ces études seules, sans le contrebalancement par les résultats négatifs et les échecs de réplication, offrent une vision biaisée de la sensibilité aux contingences sensorimotrices des bébés, qui apparaît plus infaillible qu'elle ne l'est peut-être en réalité. Nous pensons que la mise en place d'un projet sur la sensibilité aux contingences sensorimotrices chez le bébé de moins d'un an dans le cadre de la démarche « [Many Babies](#) » ([Frank et al., 2017](#)) — la réalisation dans plusieurs laboratoires en parallèle de l'exact même protocole — serait très utile à la communauté des psychologues du développement et permettrait d'assurer la répliquabilité des effets obtenus dans la littérature ainsi que de mesurer la taille de ces effets.

2.3 Limites des méthodes de mesure du savoir-faire corporel

Les études expérimentales présentées au [Chapitre 4](#) et au [Chapitre 5](#) de cette thèse ont eu pour objectif de mesurer la capacité de bébés âgés de moins d'un an à utiliser leurs corps de manière différenciée. Nous avons pour cela développé un dispositif expérimental dans lequel les mouvements d'un des bras des bébés déclenchaient l'apparition d'une stimulation audiovisuelle. Nous avons mesuré durant l'exposition à la contingence l'activité des deux bras des bébés et considéré qu'une activité égale entre les deux bras était la marque d'un savoir-faire corporel indifférencié (global), et qu'une activité supérieure du bras « connecté » par rapport à celle du bras « non-connecté » était la marque d'un savoir-faire corporel différencié (local).

Une première limite évidente des conclusions de ces études est que la méthodologie expérimentale que nous avons utilisée nécessite que les bébés soient capables de détecter une contingence

sensorimotrice, ce qui apparaît être en soi un problème épineux, comme nous l'avons longuement discuté précédemment. Par ailleurs, deux autres limites ont été fréquemment soulevées lors de la présentation de nos études à des collègues en psychologie du développement. Nous présentons dans les paragraphes suivants les deux critiques soulevées, et les réponses que souhaitons y apporter.

2.3.1 Un problème de contrôle moteur ?

La première critique soulevée concerne les capacités motrices du nourrisson. Il nous a ainsi été suggéré que les bébés ne présentant pas de différence d'activité entre les deux bras avaient peut-être détecté que les mouvements d'un seul de leur bras étaient à l'origine de la stimulation audiovisuelle, mais qu'ils n'avaient pas le contrôle moteur nécessaire pour bouger un seul de leurs bras. Autrement dit, que ces bébés possédaient la connaissance de la contingence entre les mouvements du bras « connecté » et l'apparition de la stimulation audiovisuelle, mais ne possédaient pas le contrôle moteur nécessaire pour que cette connaissance se traduise dans leur comportement. Nous proposons la réponse suivante à cette critique. Il existe des données dans la littérature montrant que les bébés sont capables de réaliser des mouvements unilatéraux des bras dès les premières semaines *post partum* (Delafield-Butt et al., 2018; van der Meer et al., 1996), et cela tout au long la première année de vie (Watanabe & Taga, 2006). De plus, il est important de rappeler que nous mesurons dans nos études la capacité des bébés à présenter une activité significativement plus élevée du bras « connecté » que du bras « non-connecté », et non une capacité des bébés à bouger uniquement le bras « connecté » sans présenter aucune activité du bras « non-connecté ». Ainsi, la présence chez un bébé de syncinésies entre les deux bras durant l'exposition à la contingence, phénomène qui s'observe très fréquemment lorsque les bébés réalisent des mouvements rapides (D'Souza et al., 2016; Soska et al., 2012), n'empêche pas que le savoir-faire corporel d'un bébé soit détecté comme différencié dans nos études.

2.3.2 Une tâche inadaptée ?

La seconde critique fréquemment soulevée est que les bébés ne cherchaient peut-être pas à explorer la contingence par des mouvements spécifiques du bras « connecté ». Cette critique se fonde sur le fait que dans nos expériences, ainsi que dans les rares autres études sur l'utilisation différenciée du corps utilisant une méthodologie comparable (Rovee-Collier et al., 1978; Watanabe & Taga, 2006), les mouvements d'un seul membre du bébé déclenchaient l'apparition de la stimulation audiovisuelle, sans que la réalisation concomitante de mouvements d'autres parties du corps n'empêche l'apparition de la stimulation contingente. Cette configuration expérimentale est nécessaire afin d'observer le savoir-faire corporel du bébé et son évolution au cours du développement, car elle permet au bébé d'explorer la contingence quel que soit son degré de savoir-faire corporel, en bougeant tout son corps, ses deux bras ou un seul de ses bras. Néanmoins, cette configuration expérimentale

tales soulève une question pertinente : les bébés ont-ils une « raison » de réaliser uniquement des mouvements du membre « connecté » ?

La réponse à cette question ne semble pas arrêtée, le oui et le non ayant tous les deux des arguments recevables. Les défenseurs du oui pourront argumenter que (i) pour une raison énergétique (voir par ex. les travaux chez le nouveau-né de [van der Meer, 1997](#)) il est préférable pour le bébé de bouger un seul de ses bras plutôt que l'ensemble de son corps, (ii) le bébé est intrinsèquement motivé à définir le plus précisément possible ses moyens d'interaction avec le monde (voir par ex. les résultats rapportés chez le bébé âgé de 2 mois par [Rochat & Striano, 1999](#)) et (iii) un tel comportement a déjà été rapporté dans la littérature chez le bébé (pour les jambes à 3.5 mois par [Rovee-Collier et al., 1978](#), et pour les bras à 4 mois par [Watanabe & Taga, 2006](#)) et s'observe chez les sujets adultes (voir l'étude préliminaire que nous avons présentée au [Chapitre 5](#)). Les partisans du non pourront eux défendre que (i) le coût de l'inhibition des actions étant élevé durant la petite enfance ([D'Souza et al., 2016](#); [Watanabe et al., 2011](#)), celui-ci est supérieur au coût engagé pour bouger tout le corps, (ii) les bébés sont intrinsèquement motivés à interagir avec leur environnement mais sans chercher à réaliser l'action la plus efficace (cela pourrait par exemple être défendu par les roboticiens, en référence à la motivation intrinsèque basée sur les compétences, voir [Section 2.2.2](#) de l'introduction générale), (iii) les bébés présentent fréquemment des comportements stéréotypés et répétitifs (voir par ex. [Thelen, 1979](#)) et pourraient ainsi « rester fidèles » à la première action leur ayant permis de déclencher la stimulation audiovisuelle et (iv) des comportements de superstition ont déjà été rapportés dans la littérature chez l'animal ou l'homme ([Skinner, 1948](#), chez le pigeon ; [Zeiler, 1973](#), chez l'enfant), comportements amenant les participants à produire des actions plus complexes que nécessaire pour obtenir une récompense.

Ainsi, il apparaît que les deux réponses sont possibles, ce qui est en accord avec les comportements des bébés que nous avons relevés durant nos études expérimentales. Nous avons noté que certains bébés présentaient un comportement similaire à celui attendu dans le cas où la réponse à la question est « oui » : des mouvements des deux bras au début de l'exposition à la contingence, puis progressivement des mouvements de plus en plus vigoureux du bras « connecté », suivi par des mouvements du bras « connecté » uniquement et, pour finir, une période de « test » du bras « non-connecté ». A l'inverse, certains bébés du même âge et rencontrés exactement dans les mêmes circonstances présentaient des comportements très différents : répétition du premier mouvement réalisé, ou alternance entre la répétition de différents mouvements, ou encore présence de comportements superstitieux (par ex. des vocalisations). Nous pouvons alors supposer que la réponse à cette question est « bébé-dépendante », et que de grandes différences inter-individuelles s'observent dans les motivations des bébés lors de l'exposition à une contingence sensorimotrice.

3 Perspectives d'application à la robotique

Les travaux réalisés dans le cadre de cette thèse, et les points de discussion présentés jusqu'à présent, se sont concentrés sur le développement du bébé. Nous souhaitons par cette troisième section établir des liens avec la robotique du développement.

3.1 Du bébé au robot

Nous proposons dans ce qui suit de passer successivement en revue une série de points de discussion, offrant chacun des parallèles entre nos travaux et la robotique du développement. A noter que les différents points discutés n'ont pas de véritables liens entre eux. Par soucis de clarté, nous les avons toutefois réunis par thématique : (i) sensibilité aux contingences sensorimotrices, (ii) savoir-faire corporel et (iii) motivation intrinsèque.

3.1.1 Sensibilité aux contingences sensorimotrices

Nos travaux de recherche ont mis en exergue les paramètres restreignant la sensibilité aux contingences sensorimotrices chez le bébé (voir [Chapitre 1](#) et [Chapitre 5](#)). Nous suggérons que cet aspect restrictif n'est pas une limite, mais un « catalyseur » du développement, car il permet de diminuer le champ d'exploration de l'environnement et ainsi de filtrer les informations pertinentes au bébé pour son apprentissage. Nous suggérons que l'application de cette sensibilité restreinte en robotique du développement pourrait participer à la résolution du problème de la taille de l'espace sensorimoteur évoqué en introduction générale ([Section 2.1.2](#)). Ainsi, l'espace sensorimoteur à explorer par l'agent pourrait être diminué par l'emploi des mêmes contraintes que celles observées chez le bébé, comme par exemple une exploration restreinte aux contingences impliquant un délai de moins de trois secondes entre l'action et le retour sensoriel (voir [Chapitre 1](#), [Section 3.1.1](#)).

De plus, les résultats de nos études pilotes ([Chapitre 5](#)) suggèrent que l'exposition à une contingence sensorimotrice provoque des comportements très différents d'un bébé à l'autre. Nous avons observé qu'en moyenne seulement la moitié des bébés détectait la contingence, l'autre moitié ne la détectant pas. Nous relevons aussi des disparités au sein des bébés ayant détecté la contingence, d'une part, concernant le temps d'exposition à la contingence avant les premiers signes de détection (certains bébés détectent la contingence dès le début de la session, et d'autres bien plus tard) et, d'autre part, à travers l'intérêt des bébés pour l'exploration de la contingence au cours de la session d'apprentissage (certains bébés explorent la contingence durant la totalité de la session, alors que d'autres semblent « se lasser » au bout d'un certain temps, et d'autres encore alternent entre l'exploration de notre contingence et l'exploration du reste de l'environnement). Nous suggérons qu'une prise en considération de la motivation intrinsèque des bébés pourrait permettre d'expliquer les différences de comportements observées. Pour cela, les roboticiens pourraient

par exemple simuler le comportement de plusieurs centaines d'agents dans l'une des situations expérimentales que nous avons mises en place pour nos études et analyser les différentes trajectoires d'apprentissage observées chez ces agents, afin de déterminer les « profils types » pouvant être adoptés. Ces « profils types » pourraient ensuite être comparés avec ceux que nous avons identifiés chez les bébés (pas de détection, détection avec un intérêt continu tout au long de la session, détection avec une perte d'intérêt en fin de session, détection avec une alternance de périodes avec intérêt et de périodes sans intérêt) et ainsi potentiellement expliquer les différences de comportements observées.

Nous avons par ailleurs montré qu'un obstacle à l'étude de la sensibilité aux contingences sensorimotrices réside en l'identification des réponses comportementales du bébé reflétant la détection d'une contingence (voir ci-dessus [Section 2.1.2](#)). Il est possible que les roboticiens puissent éventuellement apporter une aide sur ce point, en analysant les réponses comportementales observées chez leurs agents simulés, afin de développer de nouveaux critères d'apprentissage d'une contingence, qui pourraient par la suite être appliqués aux données expérimentales récoltées chez des bébés.

3.1.2 Savoir-faire corporel

Les résultats du codage vidéo présentés au [Chapitre 5](#) suggèrent que, pour une même situation expérimentale, seule une partie des bébés ayant détecté la contingence (en moyenne 80%) présentaient des signes d'une utilisation différenciée du bras impliqué dans la contingence. Les autres bébés semblaient quant à eux avoir détecté la contingence en ayant identifié une autre action que celle du bras « connecté ». L'action identifiée par les bébés correspondait alors soit à la première action réalisée par le bébé, soit à un comportement superstitieux, soit à une alternance entre plusieurs actions. Cette utilisation non-différenciée du corps, à un âge où une utilisation différenciée semble possible, pourrait s'expliquer par l'intérêt de certains bébés à simplement obtenir la stimulation audiovisuelle, plutôt qu'à définir avec détail le lien entre leurs mouvements et cette stimulation. Cette hypothèse semble trouver écho auprès des deux types de motivation intrinsèque utilisés par les roboticiens : la motivation intrinsèque basée sur les connaissances, qui pousse l'agent à acquérir de nouvelles connaissances (ici, comprendre quelle action permet d'obtenir la stimulation visuelle), et la motivation intrinsèque basée sur les compétences, qui pousse l'agent à atteindre un but (ici, obtenir la stimulation visuelle). Cette hypothèse pourrait alors être testée par les roboticiens à travers la modélisation de l'une de nos situations expérimentales et la comparaison de différents algorithmes de curiosité, ce qui offrirait aussi de mieux comprendre les comportements observés chez les bébés.

3.1.3 Motivation intrinsèque

Nous souhaitons ici approfondir la discussion concernant les deux types de motivation intrinsèque utilisés par les roboticiens du développement : la motivation intrinsèque basée sur les connaissances (KB-IM) et la motivation intrinsèque basée sur les compétences (CB-IM). Les roboticiens semblent actuellement privilégier l'utilisation de la CB-IM (voir par ex. Santucci et al., 2013). Cependant, certains travaux de psychologie du développement (présentés au Chapitre 2, Section 5 et détaillés ci-dessous, Section 4.2) suggèrent que la capacité des bébés à générer un but, puis à sélectionner et réaliser une action en fonction de ce but, est acquise uniquement vers l'âge de 18 ou 24 mois. Cela signifierait alors que la CB-IM n'est pas mise en jeu dans le développement du bébé avant cet âge, et que l'acquisition des nombreuses compétences développées par le bébé avant l'âge de 2 ans ne serait pas sous-tendue par un tel mécanisme. La prise en compte de cette question par les roboticiens pourrait leur permettre de repenser les algorithmes qu'ils utilisent, en imaginant par exemple un apprentissage fondé au départ sur la KB-IM, puis intégrant progressivement la CB-IM. Par ailleurs, les roboticiens pourraient aider à la compréhension des résultats des travaux expérimentaux mesurant la capacité des bébés à réaliser des actions dirigées vers un but (par ex. Kenward et al., 2009; Klossek & Dickinson, 2012; Klossek et al., 2008), en déterminant si les comportements observés chez le bébé peuvent être expliqués sans faire appel à la CB-IM.

3.2 Vers une étude conjointe du développement

3.2.1 Des limites à dépasser

Nous considérons que les psychologues et les roboticiens gagneraient à développer des protocoles expérimentaux de manière conjointe, afin que des bébés et des agents simulés soient testés dans des conditions comparables. En effet, nous pensons que l'intérêt d'une collaboration entre les deux domaines dans la compréhension du développement est actuellement rendue difficile par la rareté des comparaisons directes entre la psychologie et la robotique (voir néanmoins par ex. Mannella et al., 2018; Moulin-Frier et al., 2014). Cependant, la mise en place de telles comparaisons est ardue, comme en témoignent les difficultés que nous avons parfois rencontrées durant le projet **GOAL-Robots** (projet européen au sein duquel cette thèse a été réalisée). La robotique du développement étant une discipline récente, celle-ci est encore peu connue des psychologues et donc rarement considérée comme une potentielle aide à la compréhension du développement du bébé. De plus, les deux disciplines n'utilisent pas un vocabulaire commun, des incompréhensions étant facilement envisageables dès lors que des notions aussi clés que celle de « but » sont utilisées différemment par les roboticiens et les psychologues et même au sein de chacun de ces deux domaines. Une autre difficulté est posée par le fait que seule une mince part des travaux de robotique aspire à mieux comprendre le développement du bébé, la majorité ayant pour objectif d'améliorer les

performances d'apprentissage des robots en s'inspirant modestement du développement du bébé. Malgré l'intérêt indéniable de cet objectif, cette situation a pour conséquence qu'une grande partie des travaux en robotique ne sont pas applicables au développement du bébé, les roboticiens n'ayant pas d'intérêt particulier à y intégrer les contraintes corporelles, neuronales ou environnementales propres aux bébés. Ainsi, les questions de recherche abordées dans les deux domaines sont souvent très éloignées, rendant difficile la mise en place de collaborations. De plus, cette situation engendre des situations expérimentales trop éloignées pour être comparables : d'un côté, les roboticiens emploient le plus souvent des agents et des environnements simplifiés qui n'ont que peu à voir avec la vie réelle des bébés et, de l'autre côté, les psychologues développent fréquemment des protocoles ne permettant pas de distinguer d'éventuels mécanismes mis en jeu dans la réalisation de la tâche, ce qui est le cœur des travaux des roboticiens.

3.2.2 Esquisse d'une expérience collaborative

Nous proposons dans cette section une esquisse d'expérience qui pourrait être le support d'une collaboration étroite entre roboticiens et psychologues du développement, celle-ci nécessitant bien sûr d'être améliorée et détaillée par des discussions conjointes. L'expérience imaginée est la suivante : un environnement proche de celui de la « Playground Experiment » (Oudeyer et al., 2007) est installé dans plusieurs crèches et laissé à libre disposition des bébés. Cet environnement, qui a l'avantage d'être « écologique », propose aux bébés différentes contingences à explorer. Pour chaque bébé, la complexité de chaque contingence évolue au fur et à mesure du temps, et cela en fonction des comportements présentés par le bébé. L'environnement abrite de capteurs et une caméra permettant de récolter des données sur l'exploration réalisée par chaque bébé. De plus, lorsqu'un bébé pénètre dans l'environnement, celui-ci est reconnu : l'environnement se configure alors pour que le niveau de complexité des contingences corresponde à celui atteint par le bébé lors de sa dernière session d'apprentissage, et que les données enregistrées soient associées à celles précédemment récoltées pour ce bébé. L'interaction des bébés avec ce dispositif est suivie durant plusieurs mois. En parallèle, plusieurs robots sont entraînés dans des circonstances comparables, chacun des robots étant implémenté avec des algorithmes de curiosité différents. Les données des bébés et des agents simulés sont comparées afin de déterminer quel algorithme de curiosité permet le mieux de prédire les données observées chez les bébés. Ce protocole expérimental pourrait par exemple permettre d'explorer l'hypothèse selon laquelle les bébés organisent leur apprentissage de l'environnement en fonction du degré de complexité des contingences sensorimotrices offert par chaque objet de cet environnement.

Ce dispositif sera développé sous le nom d'e-gloo à partir de septembre 2019 au sein du CRI à Paris par une collaboration entre le Motion Lab (CRI) et le Lab Premiers Cris (collectif de

recherche collaboratif sur la petite enfance par le numérique, co-fondé par l'auteure de cette thèse). L'élaboration de ce dispositif est soutenue par le Ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation et par le CRI. Les contingences proposées à l'intérieur de l'e-gloo ont en partie déjà été conçues et développées par l'équipe de OVAOM et du Motion Lab (CRI)—s'y trouverons, par exemple, un objet qu'il faut gratter pour produire une lumière ou un autre sur lequel il faut souffler pour produire un son. L'idée de protocole expérimental présenté ci-dessus sera piloté l'année prochaine sur de jeunes enfants.

4 Ouverture : réflexions sur la notion d'apprentissage d'une contingence sensorimotrice

Nous souhaitons pour clore cette discussion générale présenter un ensemble de réflexions légèrement en dehors des questionnements de recherche de ce travail de thèse, mais qui offrent selon nous un prolongement pertinent aux idées discutées précédemment. La question au cœur de ces réflexions est la suivante : lorsqu'il est considéré que l'augmentation de l'activité motrice du bébé durant l'exposition à une contingence est la marque de son apprentissage de cette contingence, que faut-il comprendre par « apprentissage » ? Nous soutenons que la notion d'apprentissage d'une contingence, dans le sens généralement employé dans la littérature, mélange à tort quatre capacités du bébé qui nécessitent d'être clairement séparées² :

- La capacité du bébé à détecter la régularité entre une action et ses conséquences (détection d'une contingence sensorimotrice).
- La capacité du bébé à augmenter la fréquence d'une action lorsque celle-ci déclenche une stimulation (réponse comportementale lors de l'exposition à une contingence).
- La capacité du bébé à anticiper l'apparition d'une stimulation après la réalisation d'une action (anticipation des conséquences d'une action).
- La capacité du bébé à planifier une action dans le but d'obtenir une stimulation désirée (action dirigée vers un but).

Les points de discussion abordés jusqu'ici se sont concentrés sur le lien entre la réponse comportementale du bébé lors de l'exposition à une contingence sensorimotrice et la détection de cette contingence sensorimotrice par celui-ci. Nous discutons dans les paragraphes suivants le lien entre la réponse comportementale du bébé et les deux autres capacités énoncées ci-dessus : l'anticipation des conséquences d'une action et la réalisation d'une action dirigée vers un but. Nous proposons

²Cette idée a été proposée à l'auteure de cette thèse par Ben Kenward au cours de communications personnelles.

pour ces deux capacités des exemples de paradigmes provenant de la littérature sur le bébé, l'adulte ou l'animal, et permettant d'étudier ces deux capacités de manière spécifique.

4.1 Anticipation des conséquences d'une action

L'anticipation par le bébé des conséquences d'une action nécessite que celui-ci construise un modèle causal (ou prospectif, *forward model*) de la contingence impliquant cette action, c'est-à-dire une représentation du lien causal allant de l'action vers sa conséquence. Cet aspect de l'apprentissage d'une contingence sensorimotrice, s'il n'a pas été abordé dans le cadre de cette thèse, a pu être considéré dans la littérature comme acquis par le bébé dès lors que celui-ci montrait une réponse comportementale durant l'exposition à une contingence (voir par ex. Gergely & Watson, 1996; Watanabe et al., 2011; Watson, 1972). Mais une telle équivalence est-elle exacte ? Zaadnoordijk et al. (2018b) ont récemment montré, par une modélisation du paradigme du mobile, que la présence d'une réponse comportementale durant l'exposition à la contingence n'était pas suffisante pour conclure qu'un bébé possédait un modèle causal de la contingence sensorimotrice et que le bébé était capable d'anticiper les conséquences de son action. Dans leur article, Zaadnoordijk et ses collègues (Zaadnoordijk et al., 2018b) ont simulé un agent possédant les mêmes caractéristiques qu'un bébé âgé de 3 mois, mais n'étant pas capable de construire un modèle causal du monde³. Les auteurs ont alors comparé le comportement de leur agent simulé au comportement des bébés de l'étude de Rovee-Collier et al. (1978), durant l'exposition à la contingence (phase d'acquisition) et à l'arrêt de la contingence (phase d'extinction). Durant la phase d'acquisition, l'agent simulé et les bébés présentent un comportement équivalent : ils augmentent les mouvements de la jambe « connectée » au fur et à mesure du temps et n'augmentent pas les mouvements des autres membres. À l'inverse, les comportements de l'agent simulé et des bébés diffèrent durant la phase d'extinction. L'agent simulé montre une diminution progressive de l'activité de sa jambe « connectée » au cours de la phase d'extinction, alors que les bébés présentent eux une brusque augmentation suivie d'une brusque diminution de l'activité de leur jambe « connectée » (pattern noté ensuite « *extinction burst* »). Les auteurs ont interprété cette différence de résultats comme une preuve potentielle de la capacité des bébés âgés de 3 mois à construire le modèle causal d'une contingence sensorimotrice à laquelle ils sont exposés. Les auteurs ont néanmoins relevé que leur étude ne permet pas d'exclure l'implication d'un autre mécanisme « non-représentationnel » pouvant expliquer la présence d'un *extinction burst* chez les bébés. Les résultats de cette étude permettent toutefois de conclure avec assurance que la simple présence d'une réponse comportementale de la part du bébé (ici, une augmentation de l'activité du membre « connecté ») durant l'exposition à une contingence

³L'agent simulé est un modèle computationnel implémenté uniquement avec un mécanisme non-représentationnel de conditionnement opérant : l'agent simulé réalise des mouvements tirés au sort parmi une combinaison de mouvements possibles et lorsqu'un changement dans le signal visuel est perçu, l'action réalisée avant la perception de ce signal est répétée.

n'est pas la preuve que le bébé possède un modèle causal de la contingence.

Une solution avancée dans la littérature afin de contourner ce problème est de directement mesurer la capacité du bébé à anticiper les conséquences de son action. C'est par exemple le cas dans les études de Wang et al. (2012) ou de (Kenward, 2010), précédemment décrites (Chapitre 2, Section 5), et dans lesquelles des bébés, âgés respectivement de 6 - 8 mois et de 10 mois, étaient exposés à une contingence entre l'une de leurs actions et l'apparition d'une image ou d'une vidéo sur un écran. Les auteurs ont alors mesuré, d'une part, la capacité des bébés à montrer une augmentation de l'action contingente au cours du temps et, d'autre part, la capacité des bébés à anticiper les conséquences de cette action. Cette mesure d'anticipation, réalisée grâce à un oculomètre (*eye-tracker*), consistait plus précisément à déterminer la capacité des bébés à positionner leur regard à l'endroit de l'apparition de l'image avant l'apparition de celle-ci. Pour rappel, les résultats de ces deux études suggèrent que les bébés dès l'âge de 6 mois sont capables d'anticiper les conséquences de leurs actions.

Une seconde solution a été proposée par Zaadnoordijk et al. (2018a), tirant profit des méthodes d'imagerie cérébrale, et plus précisément de l'électroencéphalographie via l'analyse de potentiels évoqués. Les auteurs se basent sur la réaction du bébé durant la phase d'extinction, afin de déterminer si celui-ci est capable d'anticiper les conséquences de son action, autrement dit s'il possède une attente lors de la réalisation de l'action contingente. Premièrement, les auteurs ont mesuré la présence d'un *extinction burst* dans l'activité motrice des bébés, marque comportementale selon eux de la capacité du bébé à prédire les conséquences de son action (Zaadnoordijk et al., 2018b, voir la description ci-dessus). Les auteurs complètent alors cet indice comportemental par la recherche dans les potentiels évoqués d'une négativité de discordance (noté après MMN pour *mismatch negativity*) après la réalisation de l'action durant la phase d'extinction. La MMN est une composante négative des potentiels évoqués dont l'amplitude s'observe chez les bébés environ 300 ms après la violation d'une attente (voir par ex. Basirat et al., 2014; Trainor et al., 2003). Ainsi, la présence d'une composante MMN après la réalisation de l'action durant la phase d'extinction chez un bébé suggère que celui-ci possède des attentes sur les conséquences de son action et a construit un modèle causal de la contingence sensorimotrice. Zaadnoordijk et al. (2018a) ont utilisé ce protocole chez des bébés âgés de 3 - 4.5 mois dans une version modifiée du paradigme du mobile, impliquant une contingence entre les mouvements d'une image d'un mobile affichée sur un écran et les mouvements d'un des bras du bébé (les mouvements du bébé sont enregistrés grâce à des bracelets reliés en USB à un ordinateur). Les auteurs ont dans un premier temps analysé l'activité motrice des bébés durant la phase d'extinction pour y chercher la présence d'un *extinction burst*, ce qu'ils n'ont pas trouvé. Les auteurs ont alors regardé les résultats de l'analyse des potentiels évoqués et ont observé que, sur les 22 bébés testés, 10 présentent une MMN et 12 n'en présentent pas. Les auteurs ont alors ré-analysé les données de l'activité motrice des bébés pour y chercher la présence d'un

extinction burst, mais cette fois en séparant les bébés entre ceux montrant une MMN, et ceux n'en montrant pas. Les auteurs observent alors une différence comportementale très intéressante entre les deux groupes : les bébés présentant une MMN montrent aussi un *extinction burst*, celui-ci étant alors plus élevé pour le bras « connecté » que pour l'autre bras, alors que les bébés ne montrant pas de MMN ne présentent pas d'*extinction burst*. Les résultats de cette étude valident ainsi la pertinence de se baser sur la présence/absence d'un *extinction burst* afin de déterminer la capacité d'un bébé à anticiper les conséquences de l'action contingente impliquée dans une tâche.

Les bébés testés dans nos expériences étaient-ils capables d'anticiper les conséquences de l'action contingente impliquée dans nos tâches ? Répondre à cette question paraît difficile. En effet, nous n'avons pas réalisé de phase d'extinction dans nos études ni utilisé d'oculomètre (*eye-tracker*) ou d'électroencéphalographie. Une mesure alternative est offerte par le codage vidéo réalisé au [Chapitre 5](#), dans lequel l'obtention en détection d'un score de 3 en « mouvement » ou en « regard » suggère que le bébé pourrait être capable d'anticiper les conséquences de son action. Pour rappel, un score de 3 en « mouvement » correspond à la réalisation par le bébé de pauses entre deux explorations de la contingence, ce qui peut être interprété comme un test par le bébé du lien causal qu'il est en train de construire entre l'action contingente et la stimulation audiovisuelle ; et score de 3 en « regard » signifie que le bébé a anticipé les conséquences visuelles de son action en positionnant son regard à l'endroit de l'apparition de la stimulation visuelle avant l'apparition de celle-ci. Pour la série d'études pilotes réalisée au [Chapitre 5](#), nous observons que 27 bébés (sur 98 bébés) ont obtenu pour la détection de la contingence un score de 3 en « mouvement » et/ou en « regard », suggérant que 67% des 40 bébés ayant montré une sensibilité à la contingence (score de détection supérieur ou égal à 2) auraient construit un modèle causal de celle-ci. Cependant, nos expériences n'ayant pas été construites de manière à mesurer la capacité des bébés à anticiper les conséquences de leurs actions, ces mesures sont à considérer avec précaution — c'est pourquoi nous n'avons pas réalisé d'analyse à ce propos au sein du [Chapitre 5](#).

4.2 Réalisation d'une action dirigée vers un but

Le terme « action dirigée vers un but » (*goal-directed action*) est entendu ici du point de vue de la littérature sur la prise de décision : une action est dite dirigée vers un but lorsque celle-ci est sélectionnée et réalisée par l'agent dans le but d'obtenir les conséquences associées à cette action (voir par ex. [Dickinson & Balleine, 2002](#)). Cela nécessite que (i) l'agent construise un modèle inverse (*inverse model*) de la contingence sensorimotrice impliquant cette action et (ii) l'agent soit capable d'utiliser ce modèle pour sélectionner et réaliser l'action en question. A nouveau, il a parfois été considéré dans la littérature en psychologie du développement que le bébé est capable de réaliser des actions dirigées vers un but dès lors qu'il montre une réponse motrice durant l'exposition à une contingence (par ex. [Rochat & Striano, 2000](#)). Cependant, il apparaît que cette

considération naît d'une confusion entre différentes définitions du terme « action dirigée vers un but », comme nous l'avons exprimé au [Chapitre 2 \(Section 5\)](#). Un éclairage est alors offert par les travaux sur la prise de décision chez l'animal et l'adulte ou utilisant des modèles computationnels. Cette littérature distingue deux types de comportements (ou stratégies) pouvant être adoptés par un agent lors d'une prise de décision, chacun approximé par un type d'algorithme d'apprentissage par renforcement (voir par ex. [Dolan & Dayan, 2013](#), pour une revue de la littérature).

- **Les comportements habituels** - apprentissage par renforcement sans modèle (*model-free reinforcement learning*) : Les comportements habituels sont réalisés par l'agent parce qu'ils ont au préalable été renforcés positivement (apprentissage par renforcement), mais sans que cela ne demande à l'agent de posséder un « modèle du monde ». L'agent ne sélectionne pas son action dans le but d'obtenir les conséquences de cette action, mais réalise simplement celle-ci par habitude que cela lui apporte une certaine récompense dans un contexte donné. Appliqué à la littérature en psychologie du développement, dans le cas du paradigme du mobile par exemple, cela signifierait que le bébé présente une augmentation des mouvements de la jambe « connectée » au cours de la session d'apprentissage par habitude que cette action lui apporte une récompense dans ce contexte, ici voir le mobile bouger, mais non parce qu'il désire voir le mobile bouger.
- **Les comportements dirigés vers un but** - apprentissage par renforcement basé sur un modèle (*model-based reinforcement learning*) : À l'inverse des comportements habituels, la réalisation de comportements dirigés vers un but nécessite que l'agent possède un « modèle du monde », et plus précisément que l'agent soit capable dans un contexte donné de sélectionner puis réaliser une action en fonction de la récompense qu'il souhaite obtenir. Dans le contexte du paradigme du mobile, cela signifie que l'augmentation des mouvements de la jambe « connectée » durant la session d'apprentissage s'explique par le fait que (i) le bébé désire faire bouger le mobile, (ii) le bébé possède un modèle inverse de la contingence et (iii) le bébé utilise ce modèle pour sélectionner et réaliser des mouvements de la jambe « connectée ».

Afin de déterminer la nature des comportements (comportements habituels ou comportements dirigés vers un but) adoptés par un agent lors de sa prise de décision, différents paradigmes expérimentaux ont été imaginés. Les paragraphes ci-dessous offrent une brève description de ces paradigmes, ainsi qu'une discussion de leur application en psychologie du développement. Nous pensons que la présentation de ces paradigmes, même s'ils ne sont pas tous applicables en l'état à la psychologie du développement, est utile pour appréhender la notion d'action dirigée vers un but et comprendre pour quelles raisons les simples paradigmes de conditionnement opérant ne sont pas suffisants pour déterminer si un bébé est capable ou non de réaliser une action dirigée vers un

but. A noter que certains de ces paradigmes ont déjà été décrits à la [Section 5](#) du [Chapitre 2](#).

Un premier paradigme utilisé dans la littérature animale sur la prise de décision est la « tâche de déviation de Tolman » (*Tolman Detour Task*, [Tolman & Honzik \(1930\)](#)). Ce paradigme consiste à placer une souris dans la situation suivante : trois chemins peuvent être empruntés menant tous à un même point où se trouve une récompense, mais ayant des coûts différents (par ex. des distances plus ou moins longues à parcourir). Après une phase d'apprentissage, il est observé que la souris emprunte préférentiellement le chemin le moins coûteux pour atteindre la récompense. L'expérimentateur bloque alors ce chemin, ainsi que le chemin moyennement coûteux, faisant que seul le chemin le plus coûteux permette d'obtenir la récompense. La souris est à nouveau placée dans le labyrinthe : celle-ci emprunte comme à son habitude le chemin le moins coûteux, mais se retrouve bloquée. La souris peut alors constater visuellement que le chemin moyennement coûteux est lui aussi bloqué. La souris revient sur ses pas et se retrouve à l'intersection des trois chemins. La souris doit choisir quel chemin emprunter, sans qu'aucun indice ne la renseigne sur l'état des trois chemins. Cette situation permet alors de déterminer si l'action de la souris est dirigée vers un but et, plus précisément, si la souris a construit un modèle du labyrinthe qu'elle utilise pour agir. Dans le cas où la souris réalise son action en se basant sur un modèle du labyrinthe, celle-ci sélectionne et réalise la seule action permettant d'obtenir la récompense, et emprunte le chemin le plus coûteux. A l'inverse, dans le cas où son action n'est pas basée sur un modèle du labyrinthe, la souris choisit l'action pour laquelle elle a l'habitude d'obtenir une récompense et étant la moins coûteuse dans le contexte donné (c.-à-d. dans le contexte où le chemin le moins coûteux est bloqué), et emprunte le chemin moyennement coûteux, alors que cette action ne lui permet pas d'obtenir une récompense. Ce paradigme est illustré dans la [Figure D.2](#).

Une version de ce paradigme a été adaptée chez le bébé par [Paulus & Sodian \(2015\)](#). Dans leur version, [Paulus & Sodian \(2015\)](#) proposent à des bébés âgés de 18 ou de 24 mois le choix entre deux chemins, menant tous les deux à leur mère, mais variant dans leur longueur (un des chemins est long et l'autre court). Dans une première expérience, les auteurs ont observé que les bébés aux deux âges empruntaient plus fréquemment le chemin court que le chemin long. Dans une seconde expérience, les auteurs ont primordialement bloqué le chemin le plus court, puis, après que les bébés aient emprunté quatre fois le chemin long (phase d'apprentissage), ont ouvert l'accès du chemin court (phase de test). Les auteurs ont alors observé que les bébés des deux groupes d'âge adaptaient leur action à la nouvelle possibilité et empruntaient le chemin court de plus en plus fréquemment au cours de la session. Cette adaptation de la *Tolman Detour Task* ne permet pas de mesurer la capacité des bébés à réaliser des actions dirigées vers un but (ici atteindre la mère), mais indique que les bébés sont capables dès l'âge de 18 mois de sélectionner une action parmi deux, en prenant en compte le coût de réalisation de chacune de ces actions, et non uniquement en fonction de leurs habitudes.

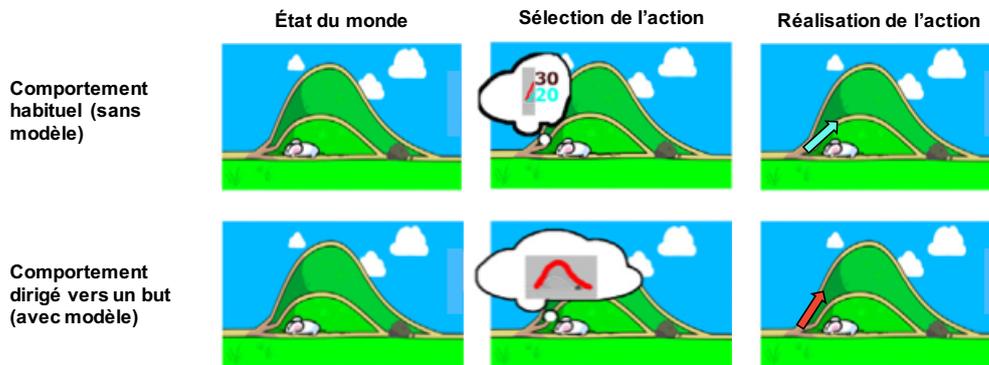


Figure D.2 – Tâche de déviation de Tolman, figure librement adaptée de Dolan & Dayan (2013). Trois chemins peuvent être empruntés par une souris, menant tous à un même point où se trouve une récompense, mais ayant des coûts différents (ici, des distances plus ou moins longues à parcourir). Après une phase d'apprentissage (non représentée ici), l'expérimentateur bloque le chemin le plus court et le chemin moyennement court, faisant que seul le chemin le plus long reste praticable (vignettes « état du monde »). La souris emprunte comme à son habitude le chemin le plus court, mais se retrouve bloquée. La souris revient sur ses pas et doit choisir quel chemin emprunter (vignettes « sélection de l'action »). Dans le cas où son action est dirigée vers un but, la souris sélectionne et réalise la seule action permettant d'obtenir la récompense, et emprunte le chemin le plus coûteux (vignette « réalisation de l'action »). A l'inverse, dans le cas où son action correspond à un comportement habituel, la souris choisit l'action la moins coûteuse dans le contexte donné, et emprunte le chemin moyennement coûteux, alors que cette action ne lui permet pas d'obtenir une récompense (vignette « réalisation de l'action »).

Un second paradigme utilisé dans la littérature en prise de décision est le paradigme de dévaluation (*devaluation paradigm*), que nous avons précédemment décrit (Chapitre 2 : Section 5). Ce paradigme, qui consiste à modifier la valence des conséquences d'une action, comporte trois phases. La première phase (phase d'apprentissage) consiste à exposer le participant à deux contingences, impliquant chacune une action différente et un effet différent. La seconde phase est la phase de « dévaluation ». Durant cette phase, la valence de l'un des deux effets précédents est modifiée, soit en le rendant moins attractif, soit en le rendant plus attractif. A l'issue de cette phase, l'efficacité de la dévaluation est mesurée par une tâche de choix forcé entre les deux effets — le participant est alors censé choisir l'effet n'ayant pas été dévalué. La troisième phase (phase de test) est assimilable à une phase d'extinction : la réalisation des actions contingentes n'entraîne plus d'effet. Cette phase permet alors de tester l'effet du changement de valence sur la prise de décision du participant et donc de déterminer si les actions de celui-ci sont ou non dirigées vers un but (ici, obtenir l'effet non-dévalué). Ainsi, lorsqu'en phase de test un participant réalise préférentiellement l'action à l'origine de l'effet non-dévalué, cela indique que les actions de celui-ci sont dirigées vers le but d'obtenir l'effet non-dévalué et, plus précisément, que (1) le participant a construit en phase d'apprentissage un modèle des deux contingences, (2) le participant a modifié ce modèle durant la phase de dévaluation, (3) le participant a formé un désir de l'effet non-dévalué durant la phase

de test et (4) le participant a sélectionné et réalisé son action en fonction de ce désir. A l'inverse, lorsque durant la phase de test le participant réalise en proportion équivalente les deux actions, cela signifie que son action n'est pas dirigée vers un but (ici, obtenir l'effet non-dévalué).

Ce paradigme très astucieux a rarement été utilisé en psychologie du développement, sûrement à cause de la complexité de sa mise en place. Il a néanmoins été adopté dans trois études réalisées chez des jeunes enfants âgés de 14 mois à 4 ans (Kenward et al., 2009; Klossek & Dickinson, 2012; Klossek et al., 2008). Ces études sont décrites au [Chapitre 2, Section 5](#). Pour rappel, les résultats de ces études suggèrent que les bébés ne sont pas capables d'actions dirigées vers un but avant l'âge de 18 mois (Klossek & Dickinson, 2012, deux sessions d'apprentissage de la contingence) voire 24 mois (Kenward et al., 2009, une seule session d'apprentissage de la contingence).

Un autre exemple de paradigme provenant de la littérature sur la prise de décision, très largement utilisé chez l'adulte ces dernières années (voir Dolan & Dayan, 2013, pour une revue de la littérature), consiste à demander au sujet de faire le choix entre deux actions, dans une situation où l'action lui ayant précédemment permis d'obtenir une récompense n'est pas celle qui lui donnera le plus de chance d'obtenir à nouveau cette récompense. Imaginons par exemple la situation suivante : tous les jours à la cantine vous avez le choix entre deux queues, chacune menant à un cuisinier proposant un choix de deux plats (il y a donc quatre plats en tout). Chaque jour les deux cuisiniers, malheureusement tous deux amateurs de mauvaise cuisine, sont affectés à l'une des deux queues : 70% du temps le cuisinier n°1 est affecté la queue de droite et le cuisinier n°2 à la queue de gauche et 30% du temps la situation est inverse. Les deux plats proposés par chaque cuisinier varient d'une semaine à l'autre, mais restent les mêmes durant toute la semaine. Ce lundi midi, vous décidez d'emprunter la queue de droite et vous tombez sur le cuisinier n°2 (situation rare donc), vous choisissez l'un des deux plats, qui s'avère être étonnamment délicieux. Le lendemain, vous souhaitez à nouveau bien manger. Quelle queue choisissez-vous ? Cette tâche de décision avec deux choix consécutifs (*sequential two-choice Markov decision task*) correspond aux situations expérimentales utilisées en laboratoire. Ainsi, la réponse donnée par le participant lors du premier choix (entre les deux queues dans notre situation) permet de déterminer dans quelle mesure le participant a ou non construit un modèle des contingences mises en jeu. Si le participant ne possède pas de modèle, celui-ci répétera simplement l'action ayant précédemment apporté une récompense, dans la situation décrite ci-dessus, il choisira la queue de droite, ce qui le mènera sûrement à un mauvais plat. A l'inverse, si le participant a construit un modèle, celui-ci sélectionnera son action en fonction de la probabilité que celle-ci le mène à la récompense désirée. Il choisira donc dans notre situation la queue de gauche, afin d'espérer tomber à nouveau sur le cuisinier n°2 et choisir le bon plat

Ce paradigme n'a à notre connaissance pas été adapté chez le bébé ou le jeune enfant, ce qui peut s'expliquer par la difficulté de la tâche à réaliser. Une version de ce paradigme adaptée aux enfants a été proposée par Decker et al. (2016), voir Figure D.3 pour une illustration. Les résultats de leur étude suggèrent que des enfants âgés de 8 - 12 ans ne sont pas capables d'employer une stratégie basée sur un modèle, et que l'emploi d'une telle stratégie émerge uniquement chez les adolescents.

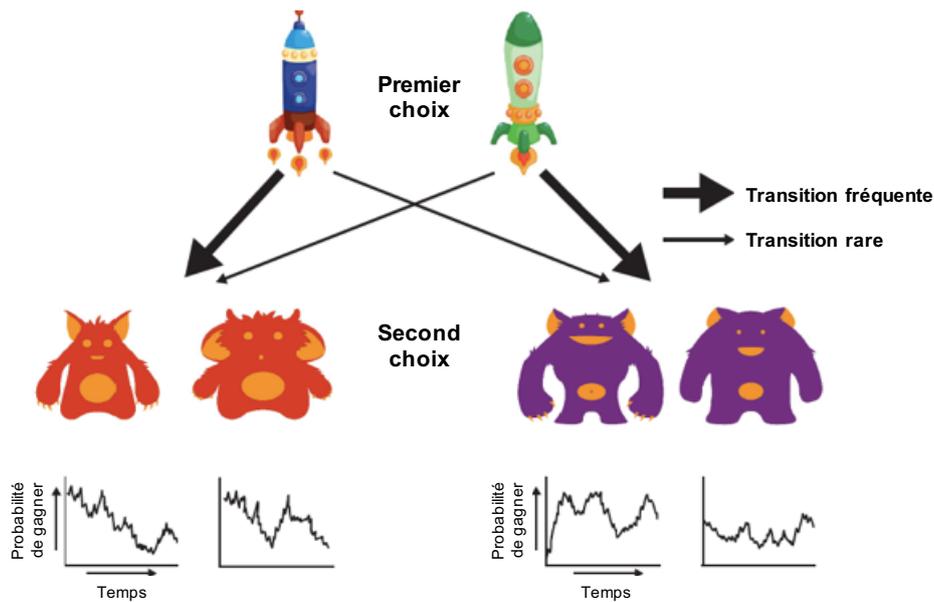


Figure D.3 – illustration de l'étude réalisée par Decker et al. (2016) chez des enfants de 8 - 12 ans, figure librement adaptée de Decker et al. (2016). Le participant doit réaliser un choix en deux étapes afin d'essayer d'obtenir une récompense. Le premier choix entre deux vaisseaux lui permet d'atteindre deux planètes différentes. Chaque vaisseau mène fréquemment à l'une des deux planètes (70%, transition fréquente) et rarement à l'autre planète et (30%, transition rare). Sur chaque planète, le participant peut choisir entre deux monstres. Le choix du monstre lui permet d'obtenir ou non une récompense, la probabilité d'obtenir une récompense associée à chaque monstre variant au cours du temps. Lors de la réalisation du premier choix, la prise en compte par le participant du degré de transition (fréquent ou rare) ou la simple réalisation par celui-ci du dernier choix récompensé permet de déterminer dans quelle mesure le participant réalise des actions dirigées vers un but (prise en compte du degré de transition) ou présente des comportements habituels (répétition de la dernière action récompensée).

4.3 Conclusion

Les réflexions explorées dans cette section et celles présentées ci-dessus (Section 2) suggèrent qu'il est essentiel de distinguer quatre capacités du bébé souvent regroupées à tort derrière la notion d'apprentissage d'une contingence : (1) la détection d'une contingence, (2) la réponse comportementale lors de l'exposition à une contingence, (3) l'anticipation des conséquences de

l'action contingente et (4) la réalisation de l'action contingente dans le but d'obtenir la stimulation. Ainsi, il apparaît que l'augmentation de l'activité du bébé durant l'exposition à une contingence, mesure sur laquelle sont basées notre étude présentée au [Chapitre 4](#) et la majorité des études dans le domaine, ne permet pas à elle seule de déterminer la capacité du bébé à détecter une contingence sensorimotrice, à anticiper les conséquences de ces actions et à réaliser une action dirigée vers un but. Les travaux de la littérature chez le bébé, l'animal ou l'adulte que nous avons présentés dans cette section et les méthodes de mesure de détection d'une contingence exposées précédemment (voir [Section 2.1](#)) offrent des idées alternatives permettant de mesurer de manière spécifique ces capacités du bébé.

Conclusion générale

Cette thèse avait pour objet d'étude la sensibilité aux contingences sensorimotrices chez le bébé et son rôle dans le développement du savoir-faire corporel, en adoptant pour cela une approche croisée entre la robotique et la psychologie du développement.

Afin de mener à bien ce travail de recherche, nous avons réalisé une revue critique de la littérature en psychologie du développement incluant environ 225 références, par laquelle nous espérons avoir atteint une vision non pas exhaustive mais du moins complète de notre sujet. Ce travail de recherche bibliographique a été à l'origine de trois revues de la littérature. La première revue avait pour objectif d'offrir, d'une part, une meilleure compréhension de la sensibilité aux contingences sensorimotrices chez le bébé et, d'autre part, des suggestions concrètes aux chercheurs souhaitant mettre en place des expériences sur le sujet. Nous y avons pour cela décrit l'influence des paramètres suivants sur la sensibilité aux contingences sensorimotrices chez le bébé : l'action et le retour sensoriel impliqués dans la contingence, le paramètre temporel, le paramètre spatial et le paramètre relationnel de la contingence, la fréquence et la probabilité d'exposition à la contingence, et les caractéristiques propres au bébé et à son milieu socioculturel. La deuxième revue de question que nous avons rédigée portait sur le rôle de la sensibilité aux contingences sensorimotrices dans le développement du bébé, rôle que nous avons illustré par quatre exemples : (i) la discrimination de l'action ou du membre impliqués dans une contingence sensorimotrice, qui permet au bébé d'acquérir de nouvelles compétences motrices et de développer son savoir-faire corporel, (ii) la mémorisation d'une contingence sensorimotrice, qui permet au bébé de mobiliser à nouveau des compétences précédemment acquises, (iii) la généralisation d'une contingence à une nouvelle situation, qui permet au bébé d'appliquer des compétences acquises dans une certaine situation à de nouvelles situations jamais rencontrées auparavant et (iv) l'utilisation d'une contingence sensorimotrice dans une action dirigée vers un but, qui permet au bébé d'atteindre une situation désirée par la réalisation d'actions adéquates. Cette revue de la littérature a été complétée par une collaboration avec G. Baldassarre et V.G. Santucci de l'ISTC-CNR (Rome), qui ont ajouté à chacun des quatre exemples décrits ci-dessus un parallèle avec la robotique, ainsi que proposé une nouvelle architecture permettant à un agent d'acquérir de nouvelles compétences motrices en le dotant d'une sensibilité aux contingences sensorimotrices. La troisième revue que nous avons réalisée avait

pour objectif principal de rendre accessibles les connaissances sur le développement du savoir-faire corporel auprès des psychologues et des professionnel.le.s de la petite enfance en France, ce que nous avons essayé de faire par le biais de la rédaction d'un article en français. Par cette revue, nous avons voulu souligner la précocité du savoir-faire corporel chez le bébé et l'importance de l'exploration du corps, de l'interaction avec l'environnement physique et de l'interaction avec les partenaires sociaux dans le développement de celui-ci.

Cette analyse de la littérature a donné naissance à l'hypothèse de travail principale de cette thèse, hypothèse selon laquelle le savoir-faire corporel du bébé se développe du global (utilisation indifférenciée des membres) au local (utilisation différenciée des membres) durant les premiers mois de la vie, comme cela a précédemment été suggéré par les résultats des études de [Watanabe & Taga \(2006\)](#) et de [Somogyi et al. \(2018\)](#). Afin d'explorer cette hypothèse, nous avons prolongé notre travail d'analyse critique de la littérature par une étude expérimentale menée par l'auteure de cette thèse sur 104 bébés âgés de 4 à 8 mois. Cette étude a consisté à mesurer l'activité motrice de bébés durant leur exposition à une contingence sensorimotrice entre les mouvements de l'un de leurs bras et une stimulation audiovisuelle, en comparaison avec l'activité d'un groupe contrôle exposé à une stimulation similaire mais non-contingente. Les résultats de cette première étude suggèrent que les bébés semblent capables entre l'âge de 4 et 8 mois de détecter une contingence entre les mouvements de l'un de leurs bras et une stimulation audiovisuelle, ainsi que de différencier le bras impliqué dans cette contingence. Néanmoins, cette étude n'a pas révélé d'évolution dans le comportement des bébés entre l'âge de 4 et 8 mois, ce qui est contraire à notre hypothèse d'un savoir-faire corporel s'affinant au cours des premiers mois de vie. Afin de mieux comprendre ce résultat inattendu, notre équipe a ensuite réalisé une série d'études pilotes menée sur 131 bébés, à laquelle l'auteure de cette thèse a largement participé. Cette série d'études pilotes nous a premièrement permis de déterminer un nouveau protocole expérimental, qui est actuellement exploité par les membres de notre équipe dans la réalisation d'une nouvelle étude sur la sensibilité aux contingences sensorimotrices chez le bébé. Par ailleurs, nous avons profité des données comportementales récoltées durant cette série d'études pilotes pour étudier de manière expérimentale l'influence des paramètres identifiés au sein de notre première revue de la littérature sur la sensibilité aux contingences sensorimotrices chez le bébé. Nous avons pour cela réalisé un codage vidéo des sessions d'apprentissage de 98 des bébés rencontrés durant nos études pilotes, en nous basant sur une grille de cotation que nous avons créée et qui nous a permis d'attribuer à chaque bébé un score de détection et un score de différenciation de la contingence impliquée dans la tâche — le codage vidéo et l'analyse des données ont été réalisés par l'auteure de cette thèse, avec l'aide de deux assistantes pour la réalisation d'un second codage. Les résultats de cette analyse suggèrent une influence positive de l'âge, du nombre de sessions d'exposition et de la saillance de l'action contingente sur les capacités de détection et de différenciation d'une contingence

sensorimotrice chez le bébé âgé de moins d'un an. Nous pouvons ainsi supposer que l'absence d'évolution avec l'âge observée lors de notre étude précédente pourrait s'expliquer par l'utilisation d'une seule session d'apprentissage dans notre protocole ou par l'utilisation d'une action contingente insuffisamment saillante. Par ailleurs, nous avons aussi exploité cette analyse vidéo pour explorer deux autres aspects du développement (en plus du savoir-faire corporel) en lien avec la sensibilité aux contingences sensorimotrices, aspects que nous avons préalablement étudiés dans notre deuxième revue de la littérature : la capacité de transfert d'une contingence d'un membre à l'autre et la capacité de généralisation d'une contingence à une nouvelle contingence. Les résultats de notre analyse sont en accord avec ceux de la littérature sur le sujet et suggèrent que les bébés âgés de moins de 9 mois possèdent de faibles capacités de transfert d'un bras à l'autre et de faibles capacités de généralisation.

Pour conclure en ce qui est de l'apport scientifique global de cette thèse, nous pouvons avancer que celle-ci a premièrement remis en question certaines des connaissances sur l'étude la sensibilité aux contingences sensorimotrices chez le bébé. En effet, la myriade d'études utilisant le conditionnement opérant chez le bébé, réalisées à partir des années 60, suggère à première vue que la mise en place d'un protocole expérimental permettant d'étudier la sensibilité aux contingences sensorimotrices chez le bébé est aisée. Les résultats expérimentaux de cette thèse remettent en question cette idée, l'obtention d'un protocole pour lequel les bébés présentent des signes explicites de sensibilité à une contingence ayant été ardue et ayant demandé la réalisation d'une série de douze études pilotes. Ce constat est soutenu par l'analyse critique de la littérature que nous avons réalisée, celle-ci montrant, d'une part, que dans plusieurs des études menées par le passé, seule une partie des bébés semblait montrer une réelle sensibilité à la contingence impliquée dans la tâche et, d'autre part, qu'une partie des études de la littérature ne permettent pas d'assurer la sensibilité des bébés à la contingence, ces études appliquant un critère de sélection des bébés (dont nous avons montré les biais) et/ou ne présentant pas de groupe contrôle. De plus, cette thèse a permis d'explorer plus en détail les liens entre psychologie et robotique en ce qui concerne le rôle de la sensibilité aux contingences sensorimotrices dans le développement. Les résultats de notre recherche suggèrent ainsi que les roboticiens pourraient tirer profit d'une meilleure exploitation de la sensibilité aux contingences dans la mise en place d'algorithmes d'apprentissage, comme nous l'avons montré par la proposition d'une nouvelle architecture réalisée en collaboration avec l'ISTC-CNR (Rome).

Nous avons par ailleurs apporté un point de vue nouveau sur le développement sensorimoteur du bébé, en introduisant la notion de savoir-faire corporel, que nous définissons comme la capacité du bébé à utiliser son corps de manière appropriée et différenciée pour interagir avec l'environnement. Nous avons prolongé les travaux théoriques menés auparavant sur le sujet en réalisant une revue de question en français, ce qui à notre connaissance n'avait pas été le cas depuis celle rédigée par

Rochat & Goubet (2000). D'un point de vue expérimental, nous avons montré que l'acquisition par le bébé d'un savoir-faire corporel différencié au niveau des bras semble déjà établi entre l'âge de 4 et 8 mois, ce qui à notre connaissance n'avait jamais été testé. Ce résultat est en accord avec les rares études de la littérature montrant une différenciation dès l'âge de 3.5 - 4 mois entre les jambes (Rovee-Collier et al., 1978) ou les bras (Watanabe & Taga, 2006). Néanmoins, nous n'avons pas observé d'évolution de la différenciation entre les deux bras entre l'âge de 4 et de 8 mois, ce qui apparaît inattendu au regard de l'évolution rapportée précédemment dans la littérature chez des bébés plus jeunes (Watanabe & Taga, 2006) ou du même âge (Somogyi et al., 2018). Nos études expérimentales ont par ailleurs remis en question les critères d'apprentissage d'une contingence utilisés précédemment dans la littérature chez le bébé, et nous avons proposé en réponse une nouvelle grille de cotation des comportements permettant de mesurer au niveau individuel la capacité d'un bébé à détecter et différencier la contingence impliquée dans une tâche. Pour finir, nous avons dans le cadre de cette recherche développé un nouvel outil d'étude de la sensibilité aux contingences sensorimotrices chez le bébé, consistant en des bracelets Bluetooth permettant de récolter les données d'activité du bébé et d'exploiter celles-ci pour créer une contingence en temps réel entre les mouvements du bébé et un retour sensoriel. Les avantages de notre dispositif sont multiples : celui-ci offre la liberté de choisir la totalité des paramètres de la contingence impliquée dans la tâche, permet de modifier ces paramètres au fur et à mesure d'une session d'apprentissage et est facilement transportable et adaptable à tous les âges.

Réflexions personnelles. En tant qu'auteure de cette thèse, je souhaite ici compléter cette synthèse par une conclusion plus personnelle. Ce travail de recherche fut marqué par les difficultés expérimentales, non tant par celles inhérentes à l'expérimentation avec de jeunes bébés que par celles posées par un protocole « qui ne marche pas » ou du moins pas comme je l'espérais, un grand nombre de bébés ne semblant pas montrer de preuves explicites de sensibilité à la contingence que j'avais conçue. Néanmoins, passée la déception de ne pas pouvoir utiliser mon protocole dans le cadre des expérimentations que j'aurais souhaité réaliser, ces difficultés expérimentales ont finalement été le moteur de nombre de mes réflexions. En effet, l'histoire dans cette thèse n'a pas été relatée de manière chronologique. J'ai mené l'étude expérimentale sur le développement du savoir-faire corporel avant la réalisation de ma revue critique de la littérature, cette étude faisant elle-même suite à une étude préliminaire que j'avais menée durant mon Master 2 sur le même sujet, et dont le protocole n'avait pas fonctionné comme espéré, peu de bébés ayant montré une sensibilité explicite à la contingence impliquée dans la tâche. C'est ainsi la réalisation de ces deux études qui m'a amenée à effectuer une large revue critique de la littérature, celle-ci ayant pour objectif de comprendre pourquoi mes protocoles ne donnaient pas des résultats similaires à ceux qui avaient été décrits par le passé. Notre équipe a ensuite mené la série d'études pilotes décrite

précédemment, qui a elle-même renforcé mon constat : la sensibilité aux contingences sensori-motrices, contrairement à ce qu'une première lecture de la littérature pourrait suggérer, est un phénomène très difficile à étudier chez le bébé. Ce constat a alors fait naître chez moi une réflexion plus générale sur la nécessité de faire de la recherche en psychologie du développement légèrement différemment. Je souhaite en conclusion souligner l'importance d'aller vers une recherche permettant la publication des résultats négatifs et valorisant les tentatives de réplication. J'ai l'espoir que la mise en place récente de collaborations entre plusieurs laboratoires ayant pour but de vérifier la validité des résultats fondamentaux de la psychologie du développement (voir par exemple le projet « [Many Babies](#) », [Frank et al. \(2017\)](#)) et la généralisation des pré-enregistrements dans les journaux scientifiques permettront de progresser sur ce point. Une autre considération, plus personnelle cette fois, est qu'il m'apparaît nécessaire d'aller vers une recherche étudiant le développement des bébés dans un contexte plus « écologique » ou, autrement dit, d'aller vers une recherche se basant aussi sur des données de la « vie réelle » des bébés. Je considère qu'une part des avancées sur ce point pourront être permises par la création de démarches de recherche participative, c'est-à-dire impliquant les parents et les professionnel.le.s de la petite enfance dans le processus de recherche, ces démarches participatives pouvant désormais s'appuyer sur les nouvelles technologies pour permettre la récolte de données à grande échelle. C'est une telle démarche participative que nous essayons de développer au sein du [Lab Premiers Cris](#), collectif de recherche collaborative sur la petite enfance par le numérique que j'ai co-fondé.

Je souhaite pour terminer brièvement discuter l'enjeu du travail de recherche réalisé dans le cadre de cette thèse. Je considère que l'intérêt principal de ce travail réside dans la démarche qui y a été entreprise. Comme je l'ai expliqué en introduction, les roboticiens se sont inspirés ces dernières années des travaux de psychologie du développement pour imaginer les algorithmes qu'ils implémentent dans leurs agents, ce qui a alors permis de considérer ces mécanismes sous un angle nouveau. J'ai dans cette thèse engagé l'étape suivante, en revenant à partir des travaux des roboticiens vers la psychologie du développement, afin d'une part d'interroger les théories et les travaux expérimentaux déjà menés et, d'autre part, d'explorer de nouvelles pistes de réflexion. La suite, comme je l'ai proposée à la [Section 3.2](#) de la discussion, serait maintenant de ne plus étudier le développement à travers deux disciplines s'inspirant l'une de l'autre, mais de manière conjointe.

Cela m'amène alors à considérer la question plus générale de l'interdisciplinarité en sciences et en recherche, question au cœur d'une thèse ayant été réalisée par mon choix dans une école doctorale interdisciplinaire. Comment réellement créer de l'interdisciplinarité en recherche ? Un premier point me semble être que la définition d'un vocabulaire commun est primordial, ce que j'ai essayé de réaliser au sein de cette thèse. L'étape suivante m'apparaît être la compréhension fine des problématiques propres à chaque discipline par les membres des deux disciplines. Atteindre cet

objectif, ce que je n'ai malheureusement pas complètement réussi en ce qui concerne la robotique, nécessite selon moi de *mettre la main à la pâte*. L'expérience acquise durant cette thèse me suggère en effet que la compréhension par les psychologues des problèmes posés par la mise en place d'un apprentissage non-supervisé en robotique serait renforcée par la pratique, comme la compréhension des méthodes expérimentales en psychologie du développement le serait pour les roboticiens par leur implication dans la conception d'expériences chez le bébé. La collaboration toujours plus étroite entre les membres des deux disciplines permettra sans aucun doute que de telles pratiques soient plus fréquentes d'ici peu.

Pour conclure, j'espère que la démarche entreprise dans le cadre de cette thèse aura apporté des éléments de réflexion pertinents au lecteur, à l'image de ce qu'elle m'a apporté.

Références

- Adamson, L. B. & Frick, J. E. (2003). The Still Face: A History of a Shared Experimental Paradigm. *Infancy*, 4(4):451–473.
- Adler, S. A. & Rovee-Collier, C. (1994). The memorability and discriminability of primitive perceptual units in infancy. *Vision Research*, 34(4):449–459.
- Adolph, K. E., Eppler, M. A., Marin, L., Weise, I. B., & Wechsler Clearfield, M. (2000). Exploration in the service of prospective control. *Infant Behavior and Development*, 23(3-4):441–460.
- Ainsworth, M. D. S., Blehar, M. C., Waters, E., & Wall, S. N. (1978). *Patterns of Attachment: A Psychological Study of the Strange Situation*. Psychology Press.
- Angulo-Barroso, R. M., Peciña, S., Lin, X., Li, M., Sturza, J., Shao, J., & Lozoff, B. (2017). Implicit learning and emotional responses in nine-month-old infants. *Cognition and Emotion*, 31(5):1031–1040.
- Angulo-Kinzler, R. M. (2001). Exploration and Selection of Intralimb Coordination Patterns in 3-Month-Old Infants. *Journal of Motor Behavior*, 33(4):363–376.
- Angulo-Kinzler, R. M., Ulrich, B., & Thelen, E. (2002). Three-Month-Old Infants Can Select Specific Leg Motor Solutions. *Motor Control*, 6:52–68.
- Anisfeld, M. (1996). Only Tongue Protrusion Modeling Is Matched by Neonates. *Developmental Review*, 16(2):149–161.
- Anisfeld, M. (2005). No compelling evidence to dispute Piaget’s timetable of the development of representational imitation in infancy. In *Perspectives on Imitation: From Neuroscience to Social Science*, 2, pages 107–131. MIT Press, Cambridge.
- Asada, M., Hosoda, K., Kuniyoshi, Y., Ishiguro, H., Inui, T., Yoshikawa, Y., Ogino, M., & Yoshida, C. (2009). Cognitive Developmental Robotics: A Survey. *IEEE Transactions on Autonomous Mental Development*, 1(1):12–34.
- Aslin, R. N. (2007). What’s in a look? *Developmental Science*, 10(1):48–53.
- Babik, I., Cunha, A. B., Ross, S. M., Logan, S. W., Galloway, J. C., & Lobo, M. A. (2018). Means-end problem solving in infancy: Development, emergence of intentionality, and transfer of knowledge. *Developmental Psychobiology*, 61(2):191–202.

- Bahrack, L. E. & Watson, J. S. (1985). Detection of Proprioceptive-Visual Contingency as a Potential Bias of Self-Perception in Infancy. *Developmental Psychology*, 2(6):963–973.
- Baillargeon, R., Spelke, E. S., & Wasserman, S. (1985). Object permanence in five-month-old infants. *Cognition*, 20(3):191–208.
- Baldassarre, G. (2011). What are intrinsic motivations? A biological perspective. In *2011 IEEE International Conference on Development and Learning (ICDL)*, pages 1–8, Frankfurt am Main, Germany. IEEE.
- Baldassarre, G., Mannella, F., Santucci, V. G., Somogyi, E., Jacquy, L., Hamilton, M., & O’Regan, J. K. (2018). Action-outcome contingencies as the engine of open-ended learning: Computational models and developmental experiments. In *In 2018 Joint IEEE 8th International Conference on Development and Learning and Epigenetic Robotics (ICDL-EpiRob)*, pages 46–53.
- Baldassarre, G. & Mirolli, M. (2013). *Intrinsically Motivated Learning in Natural and Artificial Systems*. Springer, Berlin.
- Baranes, A. & Oudeyer, P.-Y. (2013). Active learning of inverse models with intrinsically motivated goal exploration in robots. *Robotics and Autonomous Systems*, 61(1):49–73.
- Barbu-Roth, M., Anderson, D. I., Desprès, A., Provasi, J., Cabrol, D., & Campos, J. J. (2009). Neonatal Stepping in Relation to Terrestrial Optic Flow. *Child Development*, 80(1):8–14.
- Barto, A. G., Mirolli, M., & Baldassarre, G. (2013). Novelty or Surprise? In *Front. Psychol.*
- Barto, A. G., Singh, S. P., & Chentanez, N. (2004). Intrinsically Motivated Learning of Hierarchical Collections of Skills. In *Proceedings of the 3rd International Conference on Development and Learning*.
- Basirat, A., Dehaene, S., & Dehaene-Lambertz, G. (2014). A hierarchy of cortical responses to sequence violations in three-month-old infants. *Cognition*, 132(2):137–150.
- Begum Ali, J., Bremner, A. J., & Spence, C. (2015). Human infants’ ability to perceive touch in external space develops postnatally. *Current Biology*, 25:R978–R979.
- Begus, K., Gliga, T., & Southgate, V. (2014). Infants Learn What They Want to Learn: Responding to Infant Pointing Leads to Superior Learning. *PLoS ONE*, 9(10):e108817.
- Begus, K. & Southgate, V. (2012). Infant pointing serves an interrogative function: Infant pointing serves an interrogative function. *Developmental Science*, 15(5):611–617.
- Bengio, Y., Goodfellow, I., & Courville, A. (2016). *Deep Learning*. The MIT Press, Boston, MA.
- Berlyne, D. E. (1960). *Conflict, Arousal, and Curiosity*. McGraw-Hill Book Company, New York, NY, US.
- Bhat, A. & Galloway, J. (2006). Toy-oriented changes during early arm movements: Hand kinematics. *Infant Behavior and Development*, 29(3):358–372.

- Bigelow, A. & Walden, L. (2009). Infants' Response to Maternal Mirroring in the Still Face and Replay Tasks. *Infancy*, 14(5):526–549.
- Bigelow, A. E. (1998). Infants' sensitivity to familiar imperfect contingencies in social interaction. *Infant Behavior and Development*, 21(1):149–162.
- Bigelow, A. E. & Power, M. (2014). Effects of Maternal Responsiveness on Infant Responsiveness and Behavior in the Still-Face Task. *Infancy*, 19(6):558–584.
- Bigelow, A. E. & Rochat, P. (2006). Two-month-old infants' sensitivity to social contingency in mother–infant and stranger–infant interaction. *Infancy*, 9(3):313–325.
- Biro, S. & Hommel, B. (2007). Becoming an intentional agent: Introduction to the special issue. *Acta Psychologica*, 124(1):1–7.
- Bishop, C. M. (1995). *Neural Networks for Pattern Recognition*. Oxford University Press.
- Blanchard, T. C., Hayden, B. Y., & Bromberg-Martin, E. S. (2015). Orbitofrontal cortex uses distinct codes for different choice attributes in decisions motivated by curiosity. *Neuron*, 85(3):602–614.
- Bloom, K., Russell, A., & Wassenberg, K. (1987). Turn taking affects the quality of infant vocalizations. *Journal of Child Language*, 14(02):211–227.
- Bonawitz, E. B., van Schijndel, T. J., Friel, D., & Schulz, L. (2012). Children balance theories and evidence in exploration, explanation, and learning. *Cognitive Psychology*, 64(4):215–234.
- Bongard, J., Zykov, V., & Lipson, H. (2006). Resilient Machines Through Continuous Self-Modeling. *Science*, 314(5802):1118–1121.
- Bornstein, M. H., Putnick, D. L., Cote, L. R., Haynes, O. M., & Suwalsky, J. T. D. (2015). Mother-Infant Contingent Vocalizations in 11 Countries. *Psychological Science*, 26(8):1272–1284.
- Bourgeois, K. S., Khawar, A. W., Neal, S. A., & Lockman, J. J. (2005). Infant Manual Exploration of Objects, Surfaces, and Their Interrelations. *Infancy*, 8(3):233–252.
- Bremner, A. J., Mareschal, D., Lloyd-Fox, S., & Spence, C. (2008). Spatial localization of touch in the first year of life: Early influence of a visual spatial code and the development of remapping across changes in limb position. *Journal of Experimental Psychology: General*, 137(1):149–162.
- Brennan, W. M., Ames, E. W., & Moore, R. W. (1966). Age Differences in Infants' Attention to Patterns of Different Complexities. *Science*, 151:354–356.
- Bromberg-Martin, E. S. & Hikosaka, O. (2009). Midbrain dopamine neurons signal preference for advance information about upcoming rewards. *Neuron*, 63(1):119–126.
- Bruner, J. S., Jolly, A., & Sylva, K. (1976). *Play: Its Role in Development and Evolution*. Penguin, Harmondsworth.
- Butko, N. J. & Movellan, J. R. (2010). Detecting contingencies: An infomax approach. *Neural*

- Networks: The Official Journal of the International Neural Network Society*, 23(8-9):973–984.
- Butler, J. & Rovee-Collier, C. (1989). Contextual gating of memory retrieval. *Developmental Psychobiology*, 22(6):533–552.
- Butler, R. A. (1953). Discrimination Learning by Rhesus Monkeys to Visual-Exploration Motivation. *Journal of Comparative and Physiological Psychology*, 46(2):95–98.
- Butterworth, G. & Hopkins, B. (1988). Hand-mouth coordination in the new-born baby. *British Journal of Developmental Psychology*, 6(4):303–314.
- Caligiore, D., Parisi, D., & Baldassarre, G. (2014). Integrating reinforcement learning, equilibrium points, and minimum variance to understand the development of reaching: A computational model. *Psychological Review*, 121(3):389–421.
- Cangelosi, A. & Schlesinger, M. (2015). *Developmental Robotics : From Babies to Robots*. Bradford Books. MIT Press, Cambridge, MA.
- Carpenter, M., Call, J., & Tomasello, M. (2005). Twelve- and 18-month-olds copy actions in terms of goals. *Developmental Science*, 8(1):F13–F20.
- Cartoni, E. & Baldassarre, G. (2018). Autonomous discovery of the goal space to learn a parameterized skill. *arXiv:1805.07547 [cs]*.
- Chen, C.-Y., Harrison, T., & Heathcock, J. (2015). Infants with complex congenital heart diseases show poor short-term memory in the mobile paradigm at 3 months of age. *Infant Behavior and Development*, 40:12–19.
- Chen, Y.-P., Fetters, L., Holt, K. G., & Saltzman, E. (2002). Making the mobile move: Constraining task and environment. *Infant Behavior and Development*, 25(2):195–220.
- Chinn, L. K., Noonan, C. F., Hoffmann, M., & Lockman, J. J. (2019). Development of Infant Reaching Strategies to Tactile Targets on the Face. *Frontiers in Psychology*, 10.
- Clark, A. (2013). Whatever next? Predictive brains, situated agents, and the future of cognitive science. *Behavioral and Brain Sciences*, 36(3):181–204.
- Colas, C., Fournier, P., Sigaud, O., Chetouani, M., & Oudeyer, P.-Y. (2018). CURIOUS: Intrinsically Motivated Modular Multi-Goal Reinforcement Learning. *arXiv:1810.06284 [cs]*.
- Collaboration., O. S. (2015). Estimating the reproducibility of psychological science. *Science*, 349.
- Collie, R. & Hayne, H. (1999). Deferred Imitation by 6- and 9-Month-Old Infants: More Evidence for Declarative Memory. *Developmental Psychobiology*, 35:83–90.
- Collins, S. & Moore, C. (2008). The Temporal Parameters of Visual-proprioceptive Perception in Infancy. In *International Conference on Infant Studies*, Vancouver Canada.
- Colombo, J. & Mitchell, D. W. (2009). Infant visual habituation. *Neurobiology of Learning and Memory*, 92(2):225–234.

- Cook, C., Goodman, N. D., & Schulz, L. E. (2011). Where science starts: Spontaneous experiments in preschoolers' exploratory play. *Cognition*, 120(3):341–349.
- Corbetta, D., DiMercurio, A., Wiener, R. F., Connell, J. P., & Clark, M. (2018). How Perception and Action Fosters Exploration and Selection in Infant Skill Acquisition. In *Advances in Child Development and Behavior*, volume 55, pages 1–29. Elsevier.
- Corbetta, D. & Snapp-Childs, W. (2009). Seeing and touching: The role of sensory-motor experience on the development of infant reaching. *Infant Behavior and Development*, 32(1):44–58.
- Corbetta, D., Thelen, E., & Johnson, K. (2000). Motor constraints on the development of perception-action matching in infant reaching. *Infant Behavior and Development*, 23(3-4):351–374.
- Csibra, G. & Gergely, G. (2009). Natural pedagogy. *Trends in Cognitive Sciences*, 13(4):148–153.
- Csikszentmihalyi, M. (1991). *Flow—The Psychology of Optimal Experience*. Harper Perennial., New York.
- Cuevas, K., Learmonth, A. E., & Rovee-Collier, C. (2016). A dissociation between recognition and reactivation: The renewal effect at 3 months of age: Recovery of Conditioned Responding. *Developmental Psychobiology*, 58(2):159–175.
- da Silva, B. C., Baldassarre, G., Konidaris, G., & Barto, A. (2014). Learning parameterized motor skills on a humanoid robot. In *2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pages 5239–5244, Hong Kong, China. IEEE.
- de Vignemont, F. (2010). Body schema and body image—Pros and cons. *Neuropsychologia*, 48(3):669–680.
- DeCasper, A. J. & Carstens, A. A. (1981). Contingencies of stimulation: Effects on learning and emotion in neonates. *Infant Behavior and Development*, 4:19–35.
- DeCasper, A. J. & Fifer, W. (1980). On Human Bonding : Newborns Prefer their Mothers'Voices. *Science*, 208(4448):1174–1176.
- DeCasper, A. J. & Spence, M. J. (1986). Prenatal maternal speech influences newborns' perception of speech sounds. *Infant behavior and Development*, 9(2):133–150.
- Decker, J. H., Otto, A. R., Daw, N. D., & Hartley, C. A. (2016). From Creatures of Habit to Goal-Directed Learners: Tracking the Developmental Emergence of Model-Based Reinforcement Learning. *Psychological Science*, 27(6):848–858.
- Delafield-Butt, J. T., Freer, Y., Perkins, J., Skulina, D., Schögler, B., & Lee, D. N. (2018). Prospective organization of neonatal arm movements: A motor foundation of embodied agency, disrupted in premature birth. *Developmental Science*, 21(6):e12693.
- Delobel-Ayoub, M., Arnaud, C., White-Koning, M., Casper, C., Pierrat, V., Garel, M., Burguet, A., Roze, J.-C., Matis, J., Picaud, J.-C., Kaminski, M., Larroque, B., & for the EPIPAGE Study

- Group (2009). Behavioral Problems and Cognitive Performance at 5 Years of Age After Very Preterm Birth: The EPIPAGE Study. *PEDIATRICS*, 123(6):1485–1492.
- Diamond, A. (1991). Neuropsychological insights into the meaning of object concept development. In *The Jean Piaget Symposium Series. The Epigenesis of Mind: Essays on Biology and Cognition.*, pages 67–110. Lawrence Erlbaum Associates. Inc, Hillsdale, NJ, s. carey & r. gelman (eds.) edition.
- Dickinson, A. & Balleine, B. W. (2002). Causal Cognition Goal-directed Action. In *The Evolution of Cognition*, pages 185–204. The MIT Press, Cambridge, MA, c. heyes & l. huber edition.
- DiMercurio, A., Connell, J. P., Clark, M., & Corbetta, D. (2018). A Naturalistic Observation of Spontaneous Touches to the Body and Environment in the First 2 Months of Life. *Frontiers in Psychology*, 9.
- Dolan, R. J. & Dayan, P. (2013). Goals and Habits in the Brain. *Neuron*, 80(2):312–325.
- D’Souza, H., Cowie, D., Karmiloff-Smith, A., & Bremner, A. J. (2016). Specialization of the motor system in infancy: From broad tuning to selectively specialized purposeful actions. *Developmental Science*.
- Duminy, N., Nguyen, S. M., & Duhaut, D. (2018). Learning a Set of Interrelated Tasks by Using a Succession of Motor Policies for a Socially Guided Intrinsically Motivated Learner. *Frontiers in Neurorobotics*, 12:87.
- Dunham, P. & Dunham, F. (1990). Effects of Mother-Infant Social Interactions on Infants’ Subsequent Contingency Task Performance. *Child Development*, 61:785–793.
- Dunst, C. J. & Lingerfelt, B. (1985). Maternal Ratings of Temperament and Operant Learning in Two- to Three-Month-Old Infants. *Child Development*, 56(3):555.
- Elsner, B. (2007). Infants’ imitation of goal-directed actions: The role of movements and action effects. *Acta Psychologica*, 124(1):44–59.
- Elsner, B. & Aschersleben, G. (2003). Do I get what you get? Learning about the effects of self-performed and observed actions in infancy. *Consciousness and Cognition*, 12(4):732–751.
- Esseily, R., Nadel, J., & Fagard, J. (2010). Object retrieval through observational learning in 8- to 18-month-old infants. *Infant Behavior and Development*, 33:695–699.
- Esseily, R., Rat-Fischer, L., Somogyi, E., O’Regan, K. J., & Fagard, J. (2015). Humour production may enhance observational learning of a new tool-use action in 18-month-old infants. *Cognition and Emotion*, 0(0):1–9.
- Fagard, J. (1998). Changes in grasping skills and the emergence of bimanual coordination during the first year of life. In *The Psychobiology of the Hand.*, volume Clinics in Developmental Medicine, pages 123–143. Mac Keith Press, London, k. j. connolly edition.
- Fagard, J. (2001). *Le Développement Des Habiletés de l’enfant: Coordination Bimanuelle et*

- Latéralité*. CNRS Éditions, Paris : France.
- Fagard, J., Esseily, R., Jacquey, L., O'Regan, J. K., & Somogyi, E. (2018). Fetal Origin of Sensorimotor Behavior. *Frontiers in Neurorobotics*, 12.
- Fagard, J. & Jacquet, A. Y. (1996). Changes in reaching and grasping objects of different sizes between 7 and 13 months of age. *British Journal of Developmental Psychology*, 14(1):65–78.
- Fagard, J. & Lockman, J. J. (2009). Change in imitation for object manipulation between 10 and 12 months of age. *Developmental Psychobiology*, pages n/a–n/a.
- Fagard, J., Rat-Fischer, L., Esseily, R., Somogyi, E., & O'Regan, J. K. (2016). What Does It Take for an Infant to Learn How to Use a Tool by Observation? *Frontiers in Psychology*, 7.
- Fagen, J. W., Morrongiello, B. A., Rovee-Collier, C., & Gekoski, M. J. (1984). Expectancies and Memory Retrieval in Three-Month-Old Infants. *Child Development*, 55(3):936.
- Fagen, J. W. & Ohr, P. S. (1985). Temperament and crying in response to the violation of a learned expectancy in early infancy. *Infant Behavior and Development*, 8(2):157–166.
- Fagen, J. W., Ohr, P. S., Singer, J. M., & Fleckenstein, L. K. (1987). Infant Temperament and Subject Loss Due to Crying during Operant Conditioning. *Child Development*, 58(2):497.
- Fagen, J. W. & Rovee, C. K. (1976). Effects of Quantitative Shifts in a Visual Reinforcer on the Instrumental Response of Infants. *Journal of experimental child psychology*, 21:349–360.
- Fagen, J. W. & Rovee-Collier, C. K. (1983). Memory Retrieval: A Time-Locked Process in Infancy. *Science*, 222:1349–1351.
- Fantz, R. L. (1964). Visual experience in infants: Decreased attention to familiar patterns relative to novel ones. *Science*, 146(668-670).
- Farroni, T., Massaccesi, S., Pividori, D., & Johnson, M. H. (2004). Gaze Following in Newborns. *Infancy*, 5(1):39–60.
- Ferrari, G. A., Nicolini, Y., Demuru, E., Tosato, C., Hussain, M., Scesa, E., Romei, L., Boerci, M., Iappini, E., Dalla Rosa Prati, G., Palagi, E., & Ferrari, P. F. (2016). Ultrasonographic Investigation of Human Fetus Responses to Maternal Communicative and Non-communicative Stimuli. *Frontiers in Psychology*, 7.
- Festinger, L. (1957). *A Theory of Cognitive Dissonance*. Row, Peterson, Evanston, IL.
- Field, T. (2010). Postpartum depression effects on early interactions, parenting, and safety practices: A review. *Infant Behavior and Development*, 33(1):1–6.
- Field, T., Guy, L., & Umbel, V. (1985). Infant's Responses to Mothers' Imitative Behaviors. *Infant Mental Health Journal*, 6(1):40–44.
- Field, T., Nadel, J., Hernandez-Reif, M., Diego, M., Vera, Y., Gil, K., & Sanders, C. (2005). Depressed mothers' infants show less negative affect during non-contingent interactions. *Infant*

- Behavior and Development*, 28(4):426–430.
- Field, T., Woodson, R., Greenberg, R., & Cohen, D. (1982). Discrimination and Imitation of Facial Expressions by Neonates. *Science*, 218:179–181.
- Filippetti, M. L., Johnson, M. H., Lloyd-Fox, S., Dragovic, D., & Farroni, T. (2013). Body Perception in Newborns. *Current Biology*, 23(23):2413–2416.
- Filippetti, M. L., Lloyd-Fox, S., Longo, M. R., Farroni, T., & Johnson, M. H. (2015a). Neural Mechanisms of Body Awareness in Infants. *Cerebral Cortex*, 25(10):3779–3787.
- Filippetti, M. L., Orioli, G., Johnson, M. H., & Farroni, T. (2015b). Newborn Body Perception: Sensitivity to Spatial Congruency. *Infancy*, 20(4):455–465.
- Finkelstein, N. W. & Ramey, C. T. (1977). Learning to Control the Environment in Infancy. *Child Development*, 48(3):806.
- Floccia, C., Christophe, A., & Bertoncini, J. (1997). High-amplitude sucking and newborns: The quest for underlying mechanisms. *Journal of Experimental Child Psychology*, 64(2):175–198.
- Forestier, S. & Oudeyer, P.-Y. (2016). Curiosity-Driven Development of Tool Use Precursors: A Computational Model. In Papafragou, A., Grodner, D., Mirman, D., & Trueswell, J. C., editors, *38th Annual Conference of the Cognitive Science Society (CogSci 2016)*, , Proceedings of the 38th Annual Conference of the Cognitive Science Society, pages 1859–1864, Philadelphie, PA, United States.
- Forestier, S. & Oudeyer, P.-Y. (2017). A unified model of speech and tool use early development. In *39th Annual Conference of the Cognitive Science Society (CogSci 2017)*.
- Frank, M., Bergelson, E., Bergmann, C., Cristia, A., Floccia, C., Gervain, J., Hamlin, J. K., Hannon, E. E., Kline, M., Levelt, C., Lew-Williams, C., Nazzi, T., Panneton, R., Rabagliati, H., Soderstrom, M., Sullivan, J., Waxman, S., & Yurovsky, D. (2017). A collaborative approach to infant research: Promoting reproducibility, best practices, and theory-building. *Infancy*, 22:421–435.
- French, n. (1999). Catastrophic forgetting in connectionist networks. *Trends in Cognitive Sciences*, 3(4):128–135.
- Gallagher, S., Butterworth, G., Lew, A., & Cole, J. (1998). Hand–Mouth Coordination, Congenital Absence of Limb, and Evidence for Innate Body Schemas. *Brain and Cognition*, 38(1):53–65.
- Gekoski, M. J. & Fagen, J. W. (1984). Noncontingent Stimulation, Stimulus Familiarization, and Subsequent Learning in Young Infants. *Child Development*, 55(6):2226.
- Gekoski, M. J., Fagen, J. W., & Pearlman, M. A. (1984). Early Learning and Memory in the Preterm Infant. *Infant Behavior and Development*, 7:267–276.
- Gergely, G., Bekkering, H., & Király, I. (2002). Rational imitation in preverbal infants. *Nature*, 415(6873):755–755.

- Gergely, G. & Watson, J. S. (1996). The Social Biofeedback theory of parental affect-mirroring : The development of emotional self-awareness and self-control in infancy. *Journal of Psycho-Analysis*, 77:1181–1211.
- Gergely, G. & Watson, J. S. (1999). Early socio-emotional development: Contingency perception and the social-biofeedback model. *Early social cognition: Understanding others in the first months of life*, 60:101–136.
- Gerken, L., Balcomb, F. K., & Minton, J. L. (2011). Infants avoid ‘labouring in vain’ by attending more to learnable than unlearnable linguistic patterns: Infants attend more to learnable patterns. *Developmental Science*, 14(5):972–979.
- Gibson, E. J. & Pick, A. D. (2000). *An Ecological Approach to Perceptual Learning and Development*. Oxford University Press, Oxford ; New York.
- Gibson, J. J. (1979). *The Ecological Approach to Visual Perception*. Houghton-Mifflin Company., Boston.
- Goldstein, M. H., King, A. P., & West, M. J. (2003). Social interaction shapes babbling: Testing parallels between birdsong and speech. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 100(13):8030–8035.
- Goldstein, M. H. & Schwade, J. A. (2008). Social Feedback to Infants’ Babbling Facilitates Rapid Phonological Learning. *Psychological Science*, 19(5):515–523.
- Gómez, R. L. & Edgin, J. O. (2015). Sleep as a Window Into Early Neural Development: Shifts in Sleep-Dependent Learning Effects Across Early Childhood. *Child Development Perspectives*, 9(3):183–189.
- Gopnik, A. & Bonawitz, E. (2015). Bayesian models of child development. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Cognitive Science*, 6(2):75–86.
- Gopnik, A., Glymour, C., Sobel, D. M., Schulz, L. E., Kushnir, T., & Danks, D. (2004). A Theory of Causal Learning in Children: Causal Maps and Bayes Nets. *Psychological Review*, 111(1):3–32.
- Gopnik, A. & Schulz, L. E. (2007). *Causal Learning: Psychology, Philosophy, and Computation*. Oxford University Press.
- 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.
- Goupil, L., Romand-Monnier, M., & Kouider, S. (2016). Infants ask for help when they know they don’t know. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(13):3492–3496.
- Graf, F., Lamm, B., Goertz, C., Kolling, T., Freitag, C., Spangler, S., Fassbender, I., Teubert, M., Vierhaus, M., Keller, H., Lohaus, A., Schwarzer, G., & Knopf, M. (2012). Infant Contingency

- Learning in Different Cultural Contexts: Contingency Learning in Two Cultures. *Infant and Child Development*, 21(5):458–473.
- Gratier, M. (2003). Expressive timing and interactional synchrony between mothers and infants: Cultural similarities, cultural differences, and the immigration experience. *Cognitive Development*, 18(4):533–554.
- Gratier, M. & Devouche, E. (2011). Imitation and repetition of prosodic contour in vocal interaction at 3 months. *Developmental Psychology*, 47(1):67–76.
- Gratier, M., Devouche, E., Guellai, B., Infanti, R., Yilmaz, E., & Parlato-Oliveira, E. (2015). Early development of turn-taking in vocal interaction between mothers and infants. *Frontiers in Psychology*, 6.
- Greco, C., Rovee-Collier, C. K., Hayne, H., Griesler, P. C., & Earley, L. A. (1986). Ontogeny of Early Event Memory: I. Forgetting and Retrieval by 2- and 3-Month-Olds. *Infant Behavior and Development*, 9:441–460.
- Grenier, A. (1981). La motricité libérée par fixation manuelle de la nuque au cours des premières semaines de la vie. *Archives françaises de pédiatrie*, 38:557–562.
- Gros-Louis, J., West, M. J., Goldstein, M. H., & King, A. P. (2006). Mothers provide differential feedback to infants' prelinguistic sounds. *International Journal of Behavioral Development*, 30(6):509–516.
- Guerin, F., Kruger, N., & Kraft, D. (2013). A Survey of the Ontogeny of Tool Use: From Sensorimotor Experience to Planning. *IEEE Transactions on Autonomous Mental Development*, 5(1):18–45.
- Hafez, M. B., Weber, C., & Wermter, S. (2017). Curiosity-driven exploration enhances motor skills of continuous actor-critic learner. In *2017 Joint IEEE International Conference on Development and Learning and Epigenetic Robotics (ICDL-EpiRob)*, pages 39–46, Lisbon. IEEE.
- Hains, S. M. & Muir, D. W. (1996). Effects of Stimulus Contingency in Infant-Adult Interactions. *Infant Behavior and Development*, 19:49–61.
- Harlow, H. (1950). Learning and Satiation of Response in Intrinsically Motivated Complex Puzzle Performance by Monkeys. *Journal of Comparative and Physiological Psychology*, 43(4):289–294.
- Hart, S. & Grupen, R. (2011). Learning Generalizable Control Programs. *IEEE Transactions on Autonomous Mental Development*, 3(3):216–231.
- Hartshorn, K. & Rovee-Collier, C. (1997). Infant learning and long-term memory at 6 months: A confirming analysis. *Developmental Psychobiology*, 30(1):71–85.
- Hartshorn, K., Rovee-Collier, C., Gerhardstein, P., Bhatt, R. S., Klein, P. J., Aaron, F., Wondolowski, T. L., & Wurtzel, N. (1998). Developmental Changes in the Specificity of Memory over the First Year of Life. *Developmental Psychobiology*, 33:61–78.

- Hayes, L. A., Ewy, R. D., & Watson, J. S. (1982). Attention as a predictor of learning in infants. *Journal of Experimental Child Psychology*, 34(1):38–45.
- Hayne, H., Greco, C., Earley, L. A., Griesler, P. C., & Rovee-Collier, C. (1986). Ontogeny of Early Event Memory: II. Encoding and Retrieval by 2- and 3-Month-Olds. *Infant Behavior and Development*, 9:461–472.
- Hayne, H., Rovee-Collier, C., & Borza, M. A. (1991). Infant memory for place information. *Memory & Cognition*, 19(4):378–386.
- Haywood, C. H. & Burke, W. P. (1977). Development of Individual Differences in Intrinsic Motivation. In *The Structuring of Experience*. Springer US, Boston, MA.
- Heathcock, J. C., Bhat, A. N., Lobo, M. A., & Galloway, J. C. (2004). The Performance of Infants Born Preterm and Full-term in the Mobile Paradigm: Learning and Memory. *Physical Therapy*, 84:808–821.
- Heathcock, J. C., Bhat, A. N., Lobo, M. A., & Galloway, J. C. (2005). The Relative Kicking Frequency of Infants Born Full-term and Preterm During Learning and Short-term and Long-term Memory Periods of the Mobile Paradigm. *Physical Therapy*, 85:8–18.
- Herbert, J., Gross, J., & Hayne, H. (2006). Age-related changes in deferred imitation between 6 and 9 months of age. *Infant Behavior and Development*, 29(1):136–139.
- Hester, T. & Stone, P. (2017). Intrinsically Motivated Model Learning for Developing Curious Robots. *Artif. Intell.*, 247(C):170–186.
- Heyes, C. (2016). Imitation: Not in Our Genes. *Current Biology*, 26(10):R412–R414.
- Hiraki, K. (2006). Detecting contingency: A key to understanding development of self and social cognition. *Japanese Psychological Research*, 48(3):204–212.
- Hoffmann, M., Chinn, L. K., Somogyi, E., Heed, T., Fagard, J., Lockman, J. J., & O'Regan, J. K. (2017). Development of reaching to the body in early infancy: From experiments to robotic models. In *2017 Joint IEEE International Conference on Development and Learning and Epigenetic Robotics (ICDL-EpiRob)*, pages 112–119, Lisbon, Portugal. IEEE.
- Hoffmann, M., Marques, H., Arieta, A., Sumioka, H., Lungarella, M., & Pfeifer, R. (2010). Body Schema in Robotics: A Review. *IEEE Transactions on Autonomous Mental Development*, 2(4):304–324.
- Hoffmann, M. & Pfeifer, R. (2018). Robots as Powerful Allies for the Study of Embodied Cognition from the Bottom Up. *arXiv:1801.04819 [cs, q-bio]*.
- Hunt, J. M. (1965). Intrinsic Motivation and Its Role in Psychological Development. In *Nebraska Symposium on Motivation*, Lincoln, NE.
- James, W. (1890). *The Principles of Psychology*. Harvard University Press., Cambridge, MA, henry hold & company edition.

- Jamone, L., Brandao, M., Natale, L., Hashimoto, K., Sandini, G., & Takanishi, A. (2014). Autonomous online generation of a motor representation of the workspace for intelligent whole-body reaching. *Robotics and Autonomous Systems*, 62(4):556–567.
- Jamone, L., Ugur, E., Cangelosi, A., Fadiga, L., Bernardino, A., Piater, J., & Santos-Victor, J. (2016). Affordances in psychology, neuroscience and robotics: A survey. *IEEE Transactions on Cognitive and Developmental Systems*, pages 1–1.
- Jones, S. S. (2009). The development of imitation in infancy. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364(1528):2325–2335.
- Juett, J. & Kuipers, B. (2019). Learning and Acting in Peripersonal Space: Moving, Reaching, and Grasping. *Frontiers in Neurorobotics*, 13:4.
- Kagan, J. (1972). Motives and Development. *Journal of Personality and Social Psychology*, 22(1):51–66.
- Kang, M. J., Hsu, M., Krajbich, I. M., Loewenstein, G., McClure, S. M., Wang, J. T., & Camerer, C. F. (2009). The wick in the candle of learning: Epistemic curiosity activates reward circuitry and enhances memory. *Psychological Science*, 20(8):963–973.
- Kaplan, F. & Hafner, V. V. (2006). The challenges of joint attention. *Interaction Studies*, 7(2):135–169.
- Kärtner, J., Keller, H., & Yovsi, R. D. (2010). Mother–infant interaction during the first 3 months: The emergence of culture-specific contingency patterns. *Child development*, 81(2):540–554.
- Kato, M., Watanabe, H., & Taga, G. (2013). Diversity and changeability of infant movements in a novel environment. *Journal of Motor Learning and Development*, 1:79–88.
- Keller, H., Lohaus, A., Volker, S., Cappenberg, M., & Chasiotis, A. (1999). Temporal Contingency as an Independent Component of Parenting Behavior. *Child Development*, 70(2):474–485.
- Kemler Nelson, D., Jusczyk, P., Mandel, D., Myers, J., Turk, A., & Gerken, L. (1995). The head-turn preference procedure for testing auditory perception. *Infant Behavior and Development*, 18:111–116.
- Kenward, B. (2010). 10-Month-Olds Visually Anticipate an Outcome Contingent on Their Own Action. *Infancy*, 15(4):337–361.
- Kenward, B., Folke, S., Holmberg, J., Johansson, A., & Gredebäck, G. (2009). Goal directedness and decision making in infants. *Developmental psychology*, 45(3):809.
- Kidd, C. & Hayden, B. Y. (2015). The Psychology and Neuroscience of Curiosity. *Neuron*, 88(3):449–460.
- 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):e36399.

- Kidd, C., Piantadosi, S. T., & Aslin, R. N. (2014). The Goldilocks effect in infant auditory attention. *Child Development*, 85:1795–1804.
- Klimmasch, L., Schneider, J., Lelais, A., Shi, B. E., & Triesch, J. (2018). An Active Efficient Coding Model of Binocular Vision Development Under Normal and Abnormal Rearing Conditions. In Manoonpong, P., Larsen, J. C., Xiong, X., Hallam, J., & Triesch, J., editors, *From Animals to Animats 15*, volume 10994, pages 66–77. Springer International Publishing, Cham.
- Klossek, U. M. & Dickinson, A. (2012). Rational action selection in 1½- to 3-year-olds following an extended training experience. *Journal of Experimental Child Psychology*, 111(2):197–211.
- Klossek, U. M. H., Russell, J., & Dickinson, A. (2008). The control of instrumental action following outcome devaluation in young children aged between 1 and 4 years. *Journal of Experimental Psychology: General*, 137(1):39–51.
- Kohonen, T. (2001). *Self-Organizing Maps*. Springer-Verlag, Berlin.
- Kraebel, K. S., Fable, J., & Gerhardstein, P. (2004). New methodology in infant operant kicking procedures: Computerized stimulus control and computerized measurement of kicking. *Infant Behavior and Development*, 27(1):1–18.
- Kurjak, A., Stanojevic, M., Andonotopo, W., Salihagic-Kadic, A., Carrera, J., & Azumendi, G. (2004). Behavioral pattern continuity from prenatal to postnatal life a study by four-dimensional (4D) ultrasonography. *Journal of Perinatal Medicine*, 32(4).
- Kurjak, A., Tikvica, A., Stanojevic, M., Miskovic, B., Ahmed, B., Azumendi, G., & Renzo, G. C. D. (2008). The assessment of fetal neurobehavior by three-dimensional and four-dimensional ultrasound. *The Journal of Maternal-Fetal & Neonatal Medicine*, 21(10):675–684.
- Lanillos, P., Dean-Leon, E., & Cheng, G. (2017). Yielding Self-Perception in Robots Through Sensorimotor Contingencies. *IEEE Transactions on Cognitive and Developmental Systems*, 9(2):100–112.
- Lavelli, M. & Fogel, A. (2013). Interdyad differences in early mother–infant face-to-face communication: Real-time dynamics and developmental pathways. *Developmental Psychology*, 49(12):2257–2271.
- Lecanuet, J.-P. & Schaal, B. (1996). Fetal sensory competencies. *European Journal of Obstetrics & Gynecology and Reproductive Biology*, 68:1–23.
- Lee, M.-H. & Newell, K. M. (2013). Contingent auditory feedback of arm movement facilitates reaching behavior in infancy. *Infant Behavior and Development*, 36(4):817–824.
- Legerstee, M. & Markova, G. (2008). Variations in 10-month-old infant imitation of people and things. *Infant Behavior and Development*, 31(1):81–91.
- Legerstee, M., Pomerleau, A., Malcuit, G., & Feider, H. (1987). The development of infants' responses to people and a doll: Implications for research in communication. *Infant Behavior*

- and Development*, 10(1):81–95.
- Lemelin, J.-P., Tarabulsky, G. M., & Provost, M. A. (2002). Relations Between Measures of Irritability and Contingency Detection at 6 Months. *Infancy*, 3(4):543–554.
- Lewis, M., Alessandri, S. M., & Sullivan, M. W. (1990). Violation of expectancy, loss of control, and anger expressions in young infants. *Developmental Psychology*, 26(5):745.
- Lewis, M., Sullivan, M. W., & Brooks-Gunn, J. (1985). Emotional behaviour during the learning of a contingency in early infancy. *British Journal of Developmental Psychology*, 3(3):307–316.
- Lewkowicz, D. J. (1989). The Role of Temporal Factors in Infant Behavior and Development. In *Advances in Psychology*, volume 59, pages 9–62. Elsevier, North-Holland.
- Linde, E. V., Morrongiello, B. A., & Rovee-Collier, C. (1985). Determinants of Retention in 8-Week-Old Infants. *Developmental Psychology*, 21(4):601–613.
- Lipsitt, L. P., Kaye, H., & Bosack, T. N. (1966). Enhancement of neonatal sucking through reinforcement. *Journal of Experimental Child Psychology*, 4(2):163–168.
- Lobo, M. A. & Galloway, J. C. (2008). Postural and Object-Oriented Experiences Advance Early Reaching, Object Exploration, and Means–End Behavior. *Child development*, 79(6):1869–1890.
- Lockman, J. J., Ashmead, D. H., & Bushnell, E. W. (1984). The development of anticipatory hand orientation during infancy. *Journal of Experimental Child Psychology*, 37(1):176–186.
- MacKay, D. (1962). Theoretical models of space perception. In *Aspects of the Theory of Artificial Intelligence*, pages 83–104. Plenum, New York, c. a. muses edition.
- MacKay, D. (1967). Ways of looking at perception. In *Models For The Perception Of Speech And Visual Form*, pages 25–43. M.I.T. Press, Cambridge, MA, w. wathen-dunn edition.
- MacKay, D. (1973). Visual stability and voluntary eye movements. In *Handbook of Sensory Physiology*, volume VII/3A, pages 307–331. Springer, Berlin, r. jung edition.
- Maiettini, E., Pasquale, G., Rosasco, L., & Natale, L. (2018). Speeding-Up Object Detection Training for Robotics with FALKON. In *2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pages 5770–5776, Madrid. IEEE.
- Maister, L., Tang, T., & Tsakiris, M. (2017). Neurobehavioral evidence of interoceptive sensitivity in early infancy. *Elife*, 6.
- Malcuit, G., Pomerleau, A., & Lamarre, G. (1988). La recherche sur l’apprentissage opérant chez le nourrisson : un parallèle avec l’état général de la question chez l’humain. *L’année psychologique*, 88(2):257–282.
- Mannella, F., Santucci, V. G., Somogyi, E., Jacquey, L., O’Regan, J. K., & Baldassarre, G. (2018). Know Your Body Through Intrinsic Goals. *Front. Neurorobot.*
- Marraffa, R., Sperati, V., Caligiore, D., Triesch, J., & Baldassarre, G. (2012). A bio-inspired

- attention model of anticipation in gaze-contingency experiments with infants. In *Development and Learning and Epigenetic Robotics (ICDL), 2012 IEEE International Conference*, pages 1–8.
- Marx, V. & Nagy, E. (2015). Fetal Behavioural Responses to Maternal Voice and Touch. *PLOS ONE*, 10(6):e0129118.
- Mast, V. K., Fagen, J. W., Rovee-Collier, C. K., & Sullivan, M. W. (1980). Immediate and Long-Term Memory for Reinforcement Context: The Development of Learned Expectancies in Early Infancy. *Child Development*, 51(3):700.
- Mather, E. (2013). Novelty, attention, and challenges for developmental psychology. *Frontiers in Psychology*, 4.
- Mather, E. & Plunkett, K. (2011). Same items, different order: Effects of temporal variability on infant categorization. *Cognition*, 119(3):438–447.
- McClelland, J. L., Rumelhart, D. E., & Group, P. R. (1986). *Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition*. The MIT Press, Boston.
- McGovern, A. & Barto, A. G. (2001). Automatic Discovery of Subgoals in Reinforcement Learning using Diverse Density. In *2001 International Conference on Machine Learning*, page 9.
- McKirdy, L. S. & Rovee, C. K. (1978). The Efficacy of Auditory and Visual Conjugate Reinforcers in infant Conditioning. *Journal of Experimental Child Psychology*, 25:80–89.
- Meltzoff, A. N. & Moore, M. K. (1977). Imitation of Facial and Manual Gestures by Human Neonates. *Science*, 198:75–78.
- Meltzoff, A. N. & Moore, M. K. (1997). Explaining facial imitation: A theoretical model. *Early Development and Parenting*, 6(3-4):179–192.
- Meltzoff, A. N., Saby, J. N., & Marshall, P. J. (2018). Neural representations of the body in 60-day-old human infants. *Developmental Science*, page e12698.
- Merrick, K. E. (2012). Intrinsic Motivation and Introspection in Reinforcement Learning. *IEEE Transactions on Autonomous Mental Development*, 4(4):315–329.
- Merz, E. C., McDonough, L., Huang, Y. L., Foss, S., Werner, E., & Monk, C. (2017). The mobile conjugate reinforcement paradigm in a lab setting. *Developmental Psychobiology*, 59(5):668–672.
- Millar, W. S. (1972). A Study of Operant Conditioning under Delayed Reinforcement in Early Infancy. *Monographs of the Society for Research in Child Development*, 37(2):1.
- Millar, W. S. & Schaffer, H. R. (1972). The influence of spatially displaced feedback on infant operant conditioning. *Journal of Experimental Child Psychology*, 14:442–453.
- Millar, W. S. & Watson, J. S. (1979). The Effect of Delayed Feedback on Infant Learning Reexamined. *Child Development*, 50(3):747.
- Millar, W. S. & Weir, C. (2015). Baseline Response Levels are a Nuisance in Infant Contingency

- Learning: Baseline Affects Infant Learning. *Infant and Child Development*, 24(5):506–521.
- Montgomery, K. C. (1954). The Role of the Exploratory Drive in Learning. *Journal of Comparative and Physiological Psychology*, 47(1):60–64.
- Morgan, R. & Rochat, P. (1997). Intermodal Calibration of the Body in Early Infancy. *Ecological Psychology*, 9(1):1–23.
- Mori, H. & Kuniyoshi, Y. (2010). A human fetus development simulation: Self-organization of behaviors through tactile sensation. In *2010 IEEE 9th International Conference on Development and Learning*, pages 82–87, Ann Arbor, MI, USA. IEEE.
- Moulin-Frier, C., Nguyen, S. M., & Oudeyer, P.-Y. (2014). Self-organization of early vocal development in infants and machines: The role of intrinsic motivation. *Frontiers in Psychology*, 4.
- Munakata, Y., McClelland, J. L., Johnson, M. H., & Siegler, R. S. (1997). Rethinking infant knowledge: Toward an adaptive process account of successes and failures in object permanence tasks. *Psychological Review*, 104(4):686–713.
- Murray, L. & Trevarthen, C. (1985). Emotional regulation of interactions between 2 month olds and their mothers. In *Social Perception in Infants*, pages 177–197. Ablex, Norwood, NJ, field, t. m. & fox n. a. edition.
- Myowa-Yamakoshi, M. & Takeshita, H. (2006). Do Human Fetuses Anticipate Self-Oriented Actions? A Study by Four-Dimensional (4D) Ultrasonography. *Infancy*, 10(3):289–301.
- Nadel, J., Carchon, I., Kervella, C., Marcelli, D., & Reserbat-Plantey, D. (1999). Expectancies for social contingency in 2-month-olds. *Developmental Science*, 2(2):164–173.
- Nadel, J., Prepin, K., & Okanda, M. (2005). Experiencing contingency and agency: First step toward self-understanding in making a mind? *Interaction studies*, 6(3):447–462.
- Nagai, Y. (2019). Predictive learning: Its key role in early cognitive development. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 374(1771):20180030.
- Nagai, Y. & Asada, M. (2015). Predictive learning of sensorimotor information as a key for cognitive development. In *Proc. of the IROS 2015 Workshop on Sensorimotor Contingencies for Robotics*.
- Nair, A., Pong, V., Dalal, M., Bahl, S., Lin, S., & Levine, S. (2018). Visual Reinforcement Learning with Imagined Goals. *arXiv:1807.04742 [cs, stat]*.
- Natale, L., Metta, G., & Sandini, G. (2005). A Developmental Approach to Grasping. *Paper presented at the the AAAI Spring Symposium on Developmental Robotics, Stanford University*, page 6.
- Needham, A., Barrett, T., & Peterman, K. (2002). A pick-me-up for infants’ exploratory skills: Early simulated experiences reaching for objects using ‘sticky mittens’ enhances young infants’

- object exploration skills. *Infant Behavior and Development*, 25(3):279–295.
- Needham, A., Joh, A. S., Wiesen, S. E., & Williams, N. (2014). Effects of Contingent Reinforcement of Actions on Infants' Object-Directed Reaching. *Infancy*, 19(5):496–517.
- Neisser, U. (1991). Two perceptually given aspects of the self and their development. *Developmental Review*, 11:197–209.
- Northrup, J. B. (2016). Contingency detection in a complex world: A developmental model and implications for atypical development. *International Journal of Behavioral Development*.
- Ognibene, D. & Baldassare, G. (2015). Ecological Active Vision: Four Bioinspired Principles to Integrate Bottom-Up and Adaptive Top-Down Attention Tested With a Simple Camera-Arm Robot. *IEEE Transactions on Autonomous Mental Development*, 7(1):3–25.
- Ohr, P. S. & Fagen, J. W. (1991). Conditioning and long-term memory in three-month-old infants with Down Syndrome. *American Journal on Mental Retardation*, 96(2):151–162.
- Onishi, K. H. (2005). Do 15-Month-Old Infants Understand False Beliefs? *Science*, 308(5719):255–258.
- Oostenbroek, J., Slaughter, V., Nielsen, M., & Suddendorf, T. (2013). Why the confusion around neonatal imitation? A review. *Journal of Reproductive and Infant Psychology*, 31(4):328–341.
- Oostenbroek, J., Suddendorf, T., Nielsen, M., Redshaw, J., Kennedy-Costantini, S., Davis, J., Clark, S., & Slaughter, V. (2016). Comprehensive Longitudinal Study Challenges the Existence of Neonatal Imitation in Humans. *Current Biology*, 26(10):1334–1338.
- O'Regan, J. K. (2011). *Why Red Doesn't Sound like a Bell: Understanding the Feel of Consciousness*. Oxford University Press, New York.
- O'Regan, J. K. & Noë, A. (2001). A sensorimotor account of vision and visual consciousness. *Behavioral and brain sciences*, 24(5):939–973.
- Oudeyer, P.-Y., Baranes, A., & Kaplan, F. (2013). Intrinsically Motivated Learning of Real-World Sensorimotor Skills with Developmental Constraints. In Baldassarre, G. & Mirolli, M., editors, *Intrinsically Motivated Learning in Natural and Artificial Systems*, pages 303–365. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- Oudeyer, P.-Y., Gottlieb, J., & Lopes, M. (2016). Intrinsic motivation, curiosity, and learning. In *Progress in Brain Research*, volume 229, pages 257–284. Elsevier.
- Oudeyer, P.-Y. & Kaplan, F. (2007). What is intrinsic motivation? A typology of computational approaches. *Frontiers in Neurorobotics*, 1.
- Oudeyer, P.-Y., Kaplan, F., & Hafner, V. V. (2007). Intrinsic Motivation Systems for Autonomous Mental Development. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 11(2):265–286.
- Oudeyer, P.-y., Kaplan, F., Hafner, V. V., & Whyte, A. (2005). The playground experiment: Task-independent development of a curious robot. In *Proceedings of the AAAI Spring Symposium on*

- Developmental Robotics*, pages 42–47, Stanford, California. 00079.
- Palmer, C. F. (1989). The Discriminating Nature of Infants' Exploratory Actions. *Developmental Psychology*, 25(6):885–893.
- Pan, S. J. & Yang, Q. (2010). A Survey on Transfer Learning. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 22(10):1345–1359.
- Paulus, M., Hunnius, S., & Bekkering, H. (2013). Examining functional mechanisms of imitative learning in infancy: Does teleological reasoning affect infants' imitation beyond motor resonance? *Journal of Experimental Child Psychology*, 116(2):487–498.
- Paulus, M. & Király, I. (2013). Early rationality in action perception and production? A theoretical exposition. *Journal of Experimental Child Psychology*, 116(2):407–414.
- Paulus, M. & Sodian, B. (2015). Which way to take? Infants select an efficient path to their goal. *Journal of Experimental Child Psychology*, 137:111–124.
- Pavlov, I. P. (1927). *Conditioned Reflexes: An Investigation of the Physiological Activity of the Cerebral Cortex*. Oxford University Press.
- Peterson, D. (2016). The baby factory difficult research objects, disciplinary standards, and the production of statistical significance. *Socius: Sociological Research for a Dynamic World*, 2:2378023115625071.
- Piaget, J. (1936). *The Origins of Intelligence in Children [La Naissance de l'intelligence Chez l'enfant]*. M. Cook, Trans., New York, basic books edition.
- Piantadosi, S. T., Kidd, C., & Aslin, R. (2014). Rich analysis and rational models: Inferring individual behavior from infant looking data. *Developmental Science*, 17(3):321–337.
- Piontelli, A. (2010). *Development of Normal Fetal Movements: The First 25 Weeks of Gestation*. Springer-Verlag.
- Pitti, A., Mori, H., Kouzuma, S., & Kuniyoshi, Y. (2009). Contingency Perception and Agency Measure in Visuo-Motor Spiking Neural Networks. *IEEE Transactions on Autonomous Mental Development*, 1(1):86–97.
- Pomerleau, A., Malcuit, G., Chamberland, C., Laurendeau, M.-C., & Lamarre, G. (1992). Methodological problems in operant learning research with human infants. *International journal of psychology*, 27(6):417–432.
- Power, T. (2000). *Play and Exploration in Children and Animals*. Lawrence Erlbaum, Mahwah, NJ.
- Provasi, J., Dubon, C. D., & Bloch, H. (2001). Do 9- and 12-month-olds learn means-ends relation by observing? *Infant Behavior and Development*, 24(2):195–213.
- Quinn, P. C., Eimas, P. D., & Rosenkrantz, S. L. (1993). Evidence for Representations of Perceptually Similar Natural Categories by 3-Month-Old and 4-Month-Old Infants. *Perception*,

- 22(4):463–475.
- Quinn, P. C., Yahr, J., Kuhn, A., Slater, A. M., & Pascalis, O. (2002). Representation of the Gender of Human Faces by Infants: A Preference for Female. *Perception*, 31(9):1109–1121.
- Ramey, C. T. & Finkelstein, N. W. (1978). Contingent stimulation and infant competence. *Journal of Pediatric Psychology*, 3(2):89–96.
- Ramey, C. T. & Ourth, L. L. (1971). Delayed Reinforcement and Vocalization Rates of Infants. *Child Development*, 42(1):291.
- Rat-Fischer, L., Fagard, J., & O'Regan, J. K. (2014). Comparison of active and purely visual performance in a multiple-string means-end task in infants. *Cognition*, 133(1):304–316.
- Reinhart, R. F. (2017). Autonomous exploration of motor skills by skill babbling. *Autonomous Robots*, 41(7):1521–1537.
- Reissland, N. & Austen, J. (2018). Goal-directed behaviours: The development of prenatal touch behaviours. In *Reach-To-Grasp Behavior: Brain, Behavior, and Modelling Across the Life Span*, pages 3–17. Taylor & Francis, New York, NY, d. corbetta and m. santello edition.
- Reissland, N., Francis, B., Aydin, E., Mason, J., & Schaal, B. (2014). The development of anticipation in the fetus: A longitudinal account of human fetal mouth movements in reaction to and anticipation of touch: The Development of Anticipation in the Fetus. *Developmental Psychobiology*, 56(5):955–963.
- Reissland, N., Francis, B., Buttanshaw, L., Austen, J. M., & Reid, V. (2016). Do fetuses move their lips to the sound that they hear? An observational feasibility study on auditory stimulation in the womb. *Pilot and Feasibility Studies*, 2(1).
- Rochat, P. (1998). Self-perception and action in infancy. *Experimental brain research*, 123(1-2):102–109.
- Rochat, P. (2001). Social contingency detection and infant development. *Bulletin of the Menninger Clinic*, 65(3):347–360.
- Rochat, P. (2003). Five levels of self-awareness as they unfold early in life. *Consciousness and Cognition*, 12(4):717–731.
- Rochat, P. & Goubet, N. (2000). Connaissance implicite du corps au début de la vie. *Enfance*, 53(3):275–285.
- Rochat, P., Goubet, N., & Senders, S. J. (1999). To reach or not to reach? Perception of body effectivities by young infants. *Infant and Child Development*, 8(3):129–148.
- Rochat, P. & Hespos, S. J. (1997). Differential rooting response by neonates: Evidence for an early sense of self. *Early development and Parenting*, 6(34):105–112.
- Rochat, P. & Morgan, R. (1995). Spatial Determinants in the Perception of Self-Produced Leg Movements by 3- to 5-Month-Old Infants. *Developmental Psychology*, 31(4):626–636.

- Rochat, P. & Morgan, R. (1998). Two functional orientations of self-exploration in infancy. *British Journal of Developmental Psychology*, 16:139–154.
- Rochat, P., Neisser, U., & Marian, V. (1998). Are young infants sensitive to interpersonal contingency? *Infant Behavior and Development*, 21(2):355–366.
- Rochat, P. & Striano, T. (1999). Emerging self-exploration by 2-month-old infants. *Developmental Science*, 2(2):206–218.
- Rochat, P. & Striano, T. (2000). Perceived self in infancy. *Infant behavior and development*, 23(3):513–530.
- Rolf, M., Steil, J. J., & Gienger, M. (2010). Goal Babbling Permits Direct Learning of Inverse Kinematics. *IEEE Transactions on Autonomous Mental Development*, 2(3):216–229.
- Roncione, A., Hoffmann, M., Pattacini, U., & Metta, G. (2014). Automatic kinematic chain calibration using artificial skin: Self-touch in the iCub humanoid robot. In *2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pages 2305–2312.
- Rovee, C. K. & Rovee, D. T. (1969). Conjugate reinforcement of infant exploratory behavior. *Journal of experimental child psychology*, 8(1):33–39.
- Rovee-Collier, C. (1996). Shifting the focus from what to why. *Infant Behavior and Development*, 19(4):385–400.
- Rovee-Collier, C. (1999). The Development of Infant Memory. *Current Directions in Psychological Science*, 8(3):6.
- Rovee-Collier, C. & Dufault, D. (1991). Multiple contexts and memory retrieval at three months. *Developmental Psychobiology*, 24(1):39–49.
- Rovee-Collier, C. K., Enright, M., Lucas, D., Fagen, J. W., & Gekoski, M. J. (1981). The Forgetting of Newly Acquired and Reactivated Memories of 3-Month-Old Infants. *Infant Behavior and Development*, 4:317–331.
- Rovee-Collier, C. K., Griesler, P. C., & Earley, L. A. (1985). Contextual Determinants of Retrieval in Three-Month-Old Infants. *Learning and Motivation*, 16:139–157.
- Rovee-Collier, C. K., Morrongiello, B. A., Aron, M., & Kupersmidt, J. (1978). Topographical Response Differentiation and Reversal in 3-Month-Old Infants. *Infant Behavior and Development*, 1:323–333.
- Rovee-Collier, C. K. & Sullivan, M. W. (1980). Organization of Infant Memory. *Journal of Experimental Psychology: Human Learning and Memory*, 6(6):798–807.
- Rovee-Collier, C. K., Sullivan, M. W., Enright, M., Lucas, D., & Fagen, J. (1980). Reactivation of Infant Memory. *Science*, 208(4448):1159–1161.
- Ruff, H. A. (1984). Infants' Manipulative Exploration of Objects: Effects of Age and Object Characteristics. *Developmental Psychobiology*, 20(1):9–20.

- Russell, S. J. & Norvig, P. (2010). *Artificial Intelligence: A Modern Approach*. Pearson Education, New York.
- Ryan, R. M. & Deci, E. L. (2000a). Intrinsic and Extrinsic Motivations: Classic Definitions and New Directions. *Contemporary Educational Psychology*, 25(1):54–67.
- Ryan, R. M. & Deci, E. L. (2000b). Self-Determination Theory and the Facilitation of Intrinsic Motivation, Social Development, and Well-Being. *American Psychologist*, page 11.
- Saby, J. N., Meltzoff, A. N., & Marshall, P. J. (2015). Neural body maps in human infants: Somatotopic responses to tactile stimulation in 7-month-olds. *NeuroImage*, 118:74–78.
- Saffran, J. R. & Kirkham, N. Z. (2018). Infant Statistical Learning. *Annual Review of Psychology*, 69(1):181–203.
- Santucci, V. G., Baldassarre, G., & Cartoni, E. (2019). (accepted) Autonomous Reinforcement Learning of Multiple Interrelated Tasks. In *9th International Conference on Development and Learning and Epigenetic Robotics (ICDL-Epirob2019)*, Oslo.
- Santucci, V. G., Baldassarre, G., & Mirolli, M. (2012). Intrinsic motivation mechanisms for competence acquisition. In *2012 IEEE International Conference on Development and Learning and Epigenetic Robotics (ICDL)*, pages 1–6, San Diego, CA, USA. IEEE.
- Santucci, V. G., Baldassarre, G., & Mirolli, M. (2013). Which is the best intrinsic motivation signal for learning multiple skills? *Frontiers in Neurorobotics*, 7(22):e1–14.
- Santucci, V. G., Baldassarre, G., & Mirolli, M. (2014a). Cumulative learning through intrinsic reinforcements. In *Evolution, Complexity and Artificial Life*. Springer, Berlin Heidelberg.
- Santucci, V. G., Baldassarre, G., & Mirolli, M. (2014b). GRAIL: A Goal-discovering Robotic Architecture for Intrinsically-motivated Learning. *Journal of Latex Class Files*, 13(09).
- Santucci, V. G., Baldassarre, G., & Mirolli, M. (2016). GRAIL: A Goal-Discovering Robotic Architecture for Intrinsically-Motivated Learning. *IEEE Transactions on Cognitive and Developmental Systems*, 8(3):214–231.
- Sargent, B., Reimann, H., Kubo, M., & Fetters, L. (2015). Quantifying Learning in Young Infants: Tracking Leg Actions During a Discovery-learning Task. *Journal of Visualized Experiments*, (100).
- Sargent, B., Schweighofer, N., Kubo, M., & Fetters, L. (2014). Infant exploratory learning: Influence on leg joint coordination. *PloS one*, 9(3):e91500.
- Schillaci, G., Hafner, V. V., & Lara, B. (2016). Exploration Behaviors, Body Representations, and Simulation Processes for the Development of Cognition in Artificial Agents. *Frontiers in Robotics and AI*, 3.
- Schmidhuber, J. (1991). Curious model-building control systems. In *International Joint Conference on Neural Network*, volume 2, pages 1458–1463, Singapore.

- Schmuckler, M. A. (1996). Visual-Proprioceptive intermodal perception in infancy. *Infant Behavior and Development*, 19(2):221–232.
- Schmuckler, M. A. & Jewell, D. T. (2007). Infants' visual-proprioceptive intermodal perception with imperfect contingency information. *Developmental Psychobiology*, 49(4):387–398.
- Schulz, L. E. & Bonawitz, E. B. (2007). Serious fun: Preschoolers engage in more exploratory play when evidence is confounded. *Developmental psychology*, 43(4):1045.
- Schwartz, J.-L., Basirat, A., Ménard, L., & Sato, M. (2012). The Perception-for-Action-Control Theory (PACT): A perceptuo-motor theory of speech perception. *Journal of Neurolinguistics*, 25(5):336–354.
- Seepanomwan, K., Santucci, V. G., & Baldassarre, G. (2017). Intrinsically motivated discovered outcomes boost user's goals achievement in a humanoid robot. In *2017 Joint IEEE International Conference on Development and Learning and Epigenetic Robotics (ICDL-EpiRob)*, pages 178–183, Lisbon. IEEE.
- Sim, Z. L. & Xu, F. (2017). Infants preferentially approach and explore the unexpected. *British Journal of Developmental Psychology*, 35(4):596–608.
- Singer, D. G., Golinkoff, R. M., & Hirsh-Pasek, K., editors (2006). *Play=learning: How Play Motivates and Enhances Children's Cognitive and Social-Emotional Growth*. Oxford University Press, Oxford ; New York.
- Siqueland, E. R. & Delucia, C. A. (1969). Visual reinforcement of nonnutritive sucking in human infants. *Science*, 165(3898):1144–1146.
- Skinner, B. F. (1938). *The Behavior of Organisms: An Experimental Analysis*. Appleton, New York.
- Skinner, B. F. (1948). 'Superstition' in the pigeon. *Journal of Experimental Psychology: General*, 38:168–172.
- Sokolov, E. (1963). *Perception and the Conditioned Reflex*. Macmillan, New York.
- Sommerville, J. A., Woodward, A. L., & Needham, A. (2005). Action experience alters 3-month-old infants' perception of others' actions. *Cognition*, 96(1):B1–B11.
- Somogyi, E., Ara, C., Gianni, E., Rat-Fischer, L., Fattori, P., O'Regan, J. K., & Fagard, J. (2015). The roles of observation and manipulation in learning to use a tool. *Cognitive Development*, 35:186–200.
- Somogyi, E., Jacquey, L., Heed, T., Hoffmann, M., Lockman, J. J., Granjon, L., Fagard, J., & O'Regan, J. K. (2018). Which limb is it? Responses to vibrotactile stimulation in early infancy. *British Journal of Developmental Psychology*, 36(3):384–401.
- Soska, K. C., Galeon, M. A., & Adolph, K. E. (2012). On the other hand: Overflow movements of infants' hands and legs during unimanual object exploration. *Developmental Psychobiology*,

- 54(4):372–382.
- Sperati, V. & Baldassarre, G. (2017). Bio-Inspired Model Learning Visual Goals and Attention Skills Through Contingencies and Intrinsic Motivations. *IEEE Transactions on Cognitive and Developmental Systems*, 10(2):326–344.
- Stahl, A. E. & Feigenson, L. (2015). Observing the unexpected enhances infants’ learning and exploration. *Science*, 348(6230):91–94.
- Stahl, A. E. & Feigenson, L. (2017). Expectancy violations promote learning in young children. *Cognition*, 163:1–14.
- Striano, T., Henning, A., & Stahl, D. (2005). Sensitivity to social contingencies between 1 and 3 months of age. *Developmental Science*, 8(6):509–518.
- Striano, T., Henning, A., & Vaish, A. (2006). Selective looking by 12-month-olds to a temporally contingent partner. *Interaction Studies*, 7(2):233–250.
- Sullivan, M. W. & Lewis, M. (1989). Emotion and cognition in Infancy: Facial expressions during contingency Learning. *International Journal of Behavioral Development*, 12(2):221–237.
- Sullivan, M. W. & Lewis, M. (2003). Contextual determinants of anger and other negative expressions in young infants. *Developmental Psychology*, 39(4):693–705.
- Sullivan, M. W., Rovee-Collier, C. K., & Tynes, D. M. (1979). A Conditioning Analysis of Infant Long-Term Memory. *Child Development*, 50(1):152.
- Tanneberg, D., Peters, J., & Rueckert, E. (2019). Intrinsic motivation and mental replay enable efficient online adaptation in stochastic recurrent networks. *Neural Networks: The Official Journal of the International Neural Network Society*, 109:67–80.
- Tarabulsky, G. M., Tessier, R., & Kappas, A. (1996). Contingency Detection and the Contingent Organization of Behavior in Interactions: Implications for Socioemotional Development in Infancy. *Psychological Bulletin*, 120(1):25–41.
- Taylor, H. B., Barnes, M. A., Landry, S. H., Swank, P., Fletcher, J. M., & Huang, F. (2013). Motor Contingency Learning and Infants with Spina Bifida. *Journal of the International Neuropsychological Society*, 19(02):206–215.
- Taylor, M. E. & Stone, P. (2009). Transfer Learning for Reinforcement Learning Domains: A Survey. *The Journal of Machine Learning Research*, 10:1633–1685.
- Teglas, E., Girotto, V., Gonzalez, M., & Bonatti, L. L. (2007). Intuitions of probabilities shape expectations about the future at 12 months and beyond. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(48):19156–19159.
- Thelen, E. (1979). Rhythmical stereotypies in normal human infants. *Animal Behavior*, 27:669–715.
- Thelen, E. (1994). Three-month-old infants can learn task-specific patterns of interlimb coordina-

- tion. *Psychological Science*, 5(5):280–285.
- Thelen, E. & Smith, L. B. (1994). *A Dynamic Systems Approach to the Development of Cognition and Action*. MIT Press, Cambridge, MA.
- Thomas, B. L., Karl, J. M., & Whishaw, I. Q. (2015). Independent development of the Reach and the Grasp in spontaneous self-touching by human infants in the first 6 months. *Frontiers in Psychology*, 5.
- Tiernan, C. W. & Angulo-Barroso, R. M. (2008). Constrained Motor-Perceptual Task in Infancy: Effects of Sensory Modality. *Journal of Motor Behavior*, 40(2):133–142.
- Timmons, C. R. (1994). Associative links between discrete memories in early infancy. *Infant Behavior and Development*, 17(4):431–445.
- Tolman, E. & Honzik, C. (1930). Introduction and removal of reward, and maze performance in rats. *University of California Publications in Psychology* 4, pages 257–275.
- Tommasino, P., Caligiore, D., Mirolli, M., & Baldassarre, G. (2016). A Reinforcement Learning Architecture that Transfers Knowledge between Skills when Solving Multiple Tasks. *IEEE Transactions on Cognitive and Developmental Systems*, pages 1–1.
- Trainor, L., McFadden, M., Hodgson, L., Darragh, L., Barlow, J., Matsos, L., & Sonnadara, R. (2003). Changes in auditory cortex and the development of mismatch negativity between 2 and 6 months of age. *International Journal of Psychophysiology*, 51(1):5–15.
- Trevarthen, C. (1979). Communication and cooperation in early infancy: A description of primary intersubjectivity. *Before speech: The beginning of interpersonal communication.*, 1:530–571.
- Tronick, E., Als, H., Adamson, L., Wise, S., & Brazelton, T. B. (1978). The Infant’s Response to Entrapment between Contradictory Messages in Face-to-Face Interaction. *Journal of the American Academy of Child Psychiatry*, 17(1):1–13.
- Twomey, K. E., Ranson, S. L., & Horst, J. S. (2014). That’s more like it: Multiple exemplars facilitate word learning. *Infant and Child Development*, 23(2):105–122.
- Twomey, K. E. & Westermann, G. (2018). Curiosity-based learning in infants: A neurocomputational approach. *Developmental Science*, 21(4):e12629.
- Ugur, E., Nagai, Y., Sahin, E., & Oztop, E. (2015). Staged Development of Robot Skills: Behavior Formation, Affordance Learning and Imitation with Motionese. *IEEE Transactions on Autonomous Mental Development*, 7(2):119–139.
- van der Meer, A., van der Weel, F., & Lee, D. (1995). The functional significance of arm movements in neonates. *Science*, 267(5198):693–695.
- van der Meer, A., van der Weel, F., & Lee, D. N. (1996). Lifting weights in neonates: Developing visual control of reaching. *Scandinavian journal of psychology*, 37(4):424–436.
- van der Meer, A. L. (1997). Keeping the arm in the limelight: Advanced visual control of arm

- movements in neonates. *European Journal of Pediatric Neurology*, 1(4):103–108.
- van der Meer, A. L. & van der Weel, F. (2011). *Auditory Guided Arm and Whole Body Movements in Young Infants*. INTECH Open Access Publisher.
- Van Egeren, L. A., Barratt, M. S., & Roach, M. A. (2001). Mother-infant responsiveness: Timing, mutual regulation, and interactional context. *Developmental Psychology*, 37(5):684–697.
- Verschoor, S., Weidema, M., Biro, S., & Hommel, B. (2010). Where Do Action Goals Come from? Evidence for Spontaneous Action–Effect Binding in Infants. *Frontiers in Psychology*, 1.
- Verschoor, S. A. & Hommel, B. (2017). Self-By-Doing: The Role of Action for Self-Acquisition. *Social Cognition*, 35(2):127–145.
- Verschoor, S. A., Spapé, M., Biro, S., & Hommel, B. (2013). From outcome prediction to action selection: Developmental change in the role of action-effect bindings. *Developmental Science*, pages n/a–n/a.
- Voltaire, M., Gewirtz, J. L., & Pelaez, M. (2005). Infants responding compared under conjugate- and continuous-reinforcement schedules. *Behavioral Developmental Bulletin*, 1(1):71–79.
- Von Hofsten, C. (1982). Eye-Hand Coordination in the Newborn. *Developmental Psychology*, 18(3):450–461.
- von Hofsten, C. (2004). An action perspective on motor development. *Trends in Cognitive Sciences*, 8(6):266–272.
- von Hofsten, C. & Fazel-Zandy, S. (1984). Development of visually guided hand orientation in reaching. *Journal of Experimental Child Psychology*, 38(2):208–219.
- Wang, Q., Bolhuis, J., Rothkopf, C. A., Kolling, T., Knopf, M., & Triesch, J. (2012). Infants in Control: Rapid Anticipation of Action Outcomes in a Gaze-Contingent Paradigm. *PLoS ONE*, 7(2):e30884.
- Watanabe, H., Homae, F., & Taga, G. (2011). Developmental emergence of self-referential and inhibition mechanisms of body movements underling felicitous behaviors. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 37(4):1157.
- Watanabe, H. & Taga, G. (2006). General to specific development of movement patterns and memory for contingency between actions and events in young infants. *Infant Behavior and Development*, 29(3):402–422.
- Watanabe, H. & Taga, G. (2009). Flexibility in infant actions during arm- and leg-based learning in a mobile paradigm. *Infant Behavior and Development*, 32(1):79–90.
- Watanabe, H. & Taga, G. (2011). Initial-state dependency of learning in young infants. *Human Movement Science*, 30(1):125–142.
- Watson, J. S. (1967). Memory and” contingency analysis” in infant learning. *Merrill-Palmer Quarterly of Behavior and Development*, 13(1):55–76.

- Watson, J. S. (1971). Cognitive-perceptual development in infancy: Setting for the seventies. *Merrill-Palmer Quarterly of Behavior and Development*, 17(2):139–152.
- Watson, J. S. (1972). Smiling, Cooing, and "The Game". *Merrill-Palmer Quarterly of Behavior and Development*, 18(4).
- Watson, J. S. (1979). Perception of Contingent as a Determinant of Social Responsiveness. In *Origins of the Infant's Social Responsiveness*. Erlbaum, Hillsdale, NJ, eb thoman edition.
- Watson, J. S. (1984). Bases of Causal Inference in Infancy : Time, Space and Sensory Relations. In *Advances in Infancy Research*, volume 3, pages 152–165. Ablex, Norwood, NJ, l. p. lipsitt & c. rovee-collier edition.
- Watson, J. S. (1985). Contingency Perception in Early Social Development. In *Social Perception in Infants*, pages 157–176. Ablex, Norwood, NJ, t. m. field & n. a. fox edition.
- White, B. L., Castle, P., & Held, R. (1964). Observations on the Development of Visually-Directed Reaching. *Child Development*, 35:349–364.
- White, R. W. (1959). Motivation reconsidered: The concept of competence. *Psychological Review*, 66:297–333.
- Willatts, P. (1999). Development of means–end behavior in young infants: Pulling a support to retrieve a distant object. *Developmental Psychology*, 35(3):651–667.
- Williams, J. L. & Corbetta, D. (2016). Assessing the Impact of Movement Consequences on the Development of Early Reaching in Infancy. *Frontiers in Psychology*, 7.
- Yamada, Y., Kanazawa, H., Iwasaki, S., Tsukahara, Y., Iwata, O., Yamada, S., & Kuniyoshi, Y. (2016). An Embodied Brain Model of the Human Foetus. *Scientific Reports*, 6(1).
- Yu, C. & Smith, L. B. (2012). Embodied attention and word learning by toddlers. *Cognition*, 125(2):244–262.
- Zaadnoordijk, L., Meyer, M., Zaharieva, M., Kelamasari, F., van Pelt, S., & Hunnius, S. (2018a). The emerging sense of agency in early infancy.
- Zaadnoordijk, L., Otworowska, M., Kwisthout, J., & Hunnius, S. (2018b). Can infants' sense of agency be found in their behavior? Insights from babybot simulations of the mobile-paradigm. *Cognition*, 181:58–64.
- Zeiler, M. D. (1973). Superstitious Behavior in Children: An Experimental Analysis. In *Advances in Child Development and Behavior*, volume 7, pages 1–29. Elsevier.
- Zelazo, P. R., Hopkins, J. R., Jacobson, S., & Kagan, J. (1973). Psychological reactivity to discrepant events: Support for the curvilinear hypothesis. *Cognition*, 2(4):385–393.
- Zmyj, N., Hauf, P., & Striano, T. (2009). Discrimination between real-time and delayed visual feedback of self-performed leg movements in the first year of life. *Cognitie, Creier, Comportament*, 13(4):479.

- Zmyj, N., Jank, J., Schütz-Bosbach, S., & Daum, M. M. (2011). Detection of visual–tactile contingency in the first year after birth. *Cognition*, 120(1):82–89.
- Zoia, S., Blason, L., D’Ottavio, G., Bulgheroni, M., Pezzetta, E., Scabar, A., & Castiello, U. (2007). Evidence of early development of action planning in the human foetus: A kinematic study. *Experimental Brain Research*, 176(2):217–226.
- Zwicker, S., Moore, C., & Povinelli, D. J. (2012). The development of body representations: The integration of visual-proprioceptive information. In *Early Development of Body Representations*, pages 19–36. Cambridge University Press, Cambridge, UK.