

## CHAPITRE 1

# French extended abstract

---

### 1.1 Introduction

Dans les années 40, des chercheurs inventent les premières machines appelées ordinateurs. En 1956, à la conférence de Darmouth, le domaine de l'intelligence artificielle est reconnu et les premiers robots arrivent rapidement dans notre environnement. Certains de ces robots vont devoir évoluer avec les Hommes ou dans leur entourage. Entre autres, les robots "co-workers" en industrie ou les robots sociaux [Dautenhahn 2007]. Le but de cette thèse est de se rapprocher de robots qui peuvent agir conjointement avec les Hommes de manière naturelle, fluide et efficace. On se concentre ici sur les problématiques liées aux processus décisionnels durant l'action conjointe Homme-Robot.

Dans un premier temps, basé sur une étude bibliographique des éléments nécessaires à l'action conjointe entre Hommes ainsi que sur des travaux existants en interaction Homme-Robot, les différents éléments nécessaires à l'action conjointe Homme-Robot seront identifiés ainsi que la manière dont ils peuvent s'articuler dans une architecture. Puis, l'architecture du superviseur, contribution technique principale de la thèse, sera présentée. Dans un second temps, mes travaux concernant l'amélioration de la gestion des plans partagés par le robot durant l'action conjointe seront présentés. La première amélioration concerne la prise en compte des états mentaux des Hommes durant l'exécution de plans partagés. La seconde contribution concerne le report de certaines décisions prises initialement par le robot durant l'élaboration du plan et à l'exécution afin d'obtenir une gestion plus flexible des plans partagés. L'évaluation de ces deux contributions en simulation et à l'aide d'une étude utilisateur sera également présentée. Finalement, dans un troisième temps, deux autres contributions à l'action conjointe Homme-Robot seront présentées. La première concerne la gestion du comportement non-verbal et plus précisément de la tête du robot. La seconde concerne l'association d'un système d'apprentissage à un système de planification dans le cadre de la prise de décision haut niveau.

## 1.2 De l'action conjointe entre Hommes à la supervision pour l'interaction Homme-Robot

### 1.2.1 De l'action conjointe entre Hommes à l'action conjointe Homme-Robot

#### 1.2.1.1 Théorie de l'action conjointe

L'action conjointe a été décrite par [Sebanz 2006] comme :

*n'importe quelle forme d'interaction sociale où deux individus ou plus coordonnent leurs actions dans l'espace et le temps pour apporter un changement dans l'environnement.*

Plusieurs prérequis sont nécessaires pour que deux individus réalisent avec succès une action conjointe.

La première chose requise est que ces individus partagent un but et l'intention d'achever ce but. [Tomasello 2005] défini un but comme la représentation d'un état désiré par un agent et une intention comme un plan d'action qu'un agent s'engage à exécuter pour réaliser le but (basé sur le travail de Bratman [Bratman 1989]). Dans le cas de l'action conjointe, une des définitions les plus reconnues est celle de Bratman [Bratman 1993] qui présente trois conditions pour que deux individus partagent une *intention jointe* d'accomplir un but G :

1. Chaque individu a l'intention d'accomplir G.
2. Chaque individu a cette intention en accord avec 1 et les parties du plan partagé de 1.
3. 1 et 2 sont une connaissance commune entre chaque individu.

Cette définition est reprise et illustrée par Tomasello et al. dans [Tomasello 2005] (Fig. 1.1). Ils définissent un *but partagé* comme une représentation d'un état désiré plus la connaissance que le but va être réalisé en collaboration et une *intention jointe* comme un plan partagé auquel les agents se sont engagés pour réaliser le but. Concernant ce plan partagé, cette notion a été introduite et formalisée par Grosz and Sidner [Grosz 1988]. Leur définition suggère que chaque agent ne connaît pas nécessairement le plan entier mais seulement la partie qui le concerne et les parties en intersection avec celles de ses partenaires.

Un deuxième prérequis de l'action jointe est que chaque agent doit être capable de percevoir et de prédire les actions de ses partenaires et leurs effets. A partir des travaux de [Sebanz 2006], [Pacherie 2011] et [Obhi 2011] nous avons identifié plusieurs capacités nécessaires à ces prédictions :

- **L'attention jointe** : la capacité d'un agent à diriger son attention vers le même objet que ses partenaires de manière à partager la même représentation de l'environnement et des événements.
- **Observation de l'action** : plusieurs études ont montré que quand quelqu'un observe une autre personne réaliser une action, une représentation de

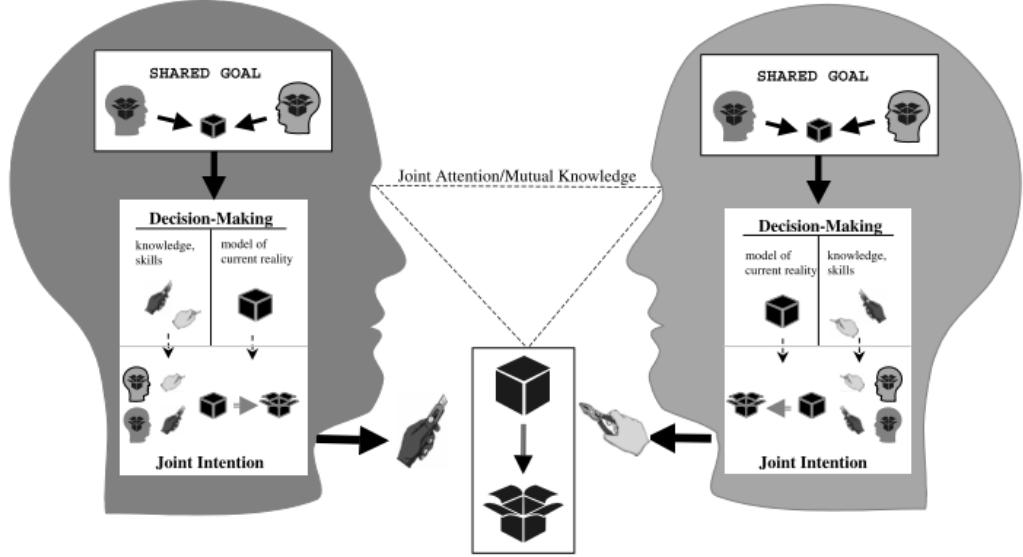


FIGURE 1.1 – Exemple d'une activité collaborative par Tomasello et al. Ici les deux hommes ont pour **but partagé** d'ouvrir la boîte ensemble. Ils ont choisi un moyen d'atteindre ce but qui prend en compte les capacités de chaque agent et ont donc une *intention jointe*.

cette action est formée par l'observateur par ce qu'on appelle les *neurones miroirs* et permet de prédire les effets de l'action [Rizzolatti 2004].

- **Co-représentation** : avoir une représentation de son partenaire (son but, ses capacités, ses connaissances, etc...) permet de prédire ses actions futures.
- **Agency** : la capacité d'attribuer les effets d'une action au bon acteur.

Grâce à ces capacités, plusieurs prédictions peuvent être effectuées :

- **Quoi** : prédire quelle action un agent va réaliser.
- **Quand** : prédire quand une action va avoir lieu et combien de temps elle va durer pour mieux se coordonner dans le temps.
- **Où** : prédire les futures positions de ses partenaires pour mieux se coordonner dans l'espace.

Finalement, pendant l'action conjointe, les agents doivent être capables de coordonner leurs actions dans le temps et l'espace. Deux sortes de coordination sont définies dans [Knoblich 2011] :

- **La coordination émergente** : qui a lieu intentionnellement. La coordination émergente peut être due à plusieurs mécanismes tels que *l'entraînement* [Richardson 2007], des *affordances* communes [Gibson 1977] ou la perception d'une action.
- **La coordination planifiée** : qui est, elle, intentionnelle. Pour cela, les agents peuvent modifier leur comportement avec ce qui est défini par [Vesper 2010] comme des *coordination smoothers* (mouvements plus prédictibles, signaux de coordination, etc...) ou utiliser la communication verbale

ou non-verbale [Clark 1996].

### 1.2.1.2 Comment doter un robot des capacités nécessaires à l'action conjointe ?

Plusieurs travaux ont déjà été réalisés afin de doter le robot des capacités nécessaires à la réalisation d'une action conjointe avec l'Homme.

Dans un premier temps, le robot doit être capable de s'engager dans une action conjointe, de choisir un but. Ce but peut être imposé par l'utilisateur mais le robot doit aussi être capable de pro-activement proposer son aide. Pour faire cela, plusieurs travaux ont été réalisés concernant la reconnaissance de plans [Ramirez 2009, Bui 2003, Singla 2011] et d'intentions [Breazeal 2009, Baker 2014]. Le robot doit également être capable de choisir entre différents buts possibles. Pour faire cela le domaine de l'intelligence artificielle a commencé à proposer plusieurs solutions [Ghallab 1994, Lemai 2004, Roberts 2016]. Une fois le robot engagé dans une action conjointe, il doit être capable de surveiller l'engagement de ses partenaires. Des réponses à ce problème ont été données en utilisant les signaux visuels et gestes [Sanghvi 2011] ou le contexte et les états mentaux [Salam 2015]. Enfin, une fois le robot engagé dans un but, il doit être capable d'obtenir un plan partagé. Ce plan peut être imposé par l'utilisateur et le robot doit alors être capable de le comprendre [Pointeau 2014, Mohseni-Kabir 2015] et éventuellement de le retransmettre [Petit 2013, Sorce 2015]. Le plan peut aussi être construit en collaboration [Allen 2002] ou élaboré par le robot [Cirillo 2010, Lallement 2014]. Si le robot élabore le plan, il doit également être capable de communiquer à son sujet [Milliez 2016].

Afin de mieux communiquer et travailler avec l'Homme, le robot doit être capable d'aligner sa représentation du monde (données en  $x$ ,  $y$ ,  $z$  venant des capteurs) avec celle de l'Homme (relations sémantiques entre objets). Ce processus a été étudié et s'appelle *l'ancre* [Coradeschi 2003, Mavridis 2005, Lemaignan 2012]. Le robot doit également être capable de représenter son environnement non seulement de son point de vue mais aussi de celui de ses partenaires. La prise de perspective du robot [Breazeal 2006, Milliez 2014] peut être utilisée pour résoudre des situations ambiguës [Ros 2010], mieux interagir durant le dialogue [Ferreira 2015] ou reconnaître et interpréter les actions de l'Homme [Baker 2014, Nagai 2015].

Finalement, le robot doit être capable de se coordonner avec l'Homme. A un haut niveau, l'Homme et le robot doivent coordonner leurs actions afin de réaliser le plan partagé avec succès. Plusieurs systèmes permettent de faire cela tels que *Chaski* [Shah 2011], *Pike* [Karpas 2015] ou *SHARY* [Clodic 2009]. Pour faire cela, le robot doit se repérer sur ses capacités de communication verbale [Roy 2000, Lucignano 2013, Ferreira 2015] et non-verbale [Breazeal 2005, Boucher 2010, Mutlu 2009b, Hart 2014]. A un plus bas niveau, le robot doit se coordonner avec l'Homme durant l'exécution d'actions telles que le transfert d'un objet. Cela représente plusieurs challenges tels que trouver des postures acceptables par l'Homme [Cakmak 2011, Dehais 2011, Mainprice 2012], ap-

procher un Homme [Walters 2007] ou produire des trajectoires lisibles et prédictibles [Sisbot 2012, Kruse 2013].

### 1.2.1.3 Une architecture trois niveaux

Nous avons vu précédemment les prérequis pour l'action conjointe entre Hommes et Homme-Robot. Nous allons maintenant voir comment ces éléments se combinent en une architecture trois niveaux.

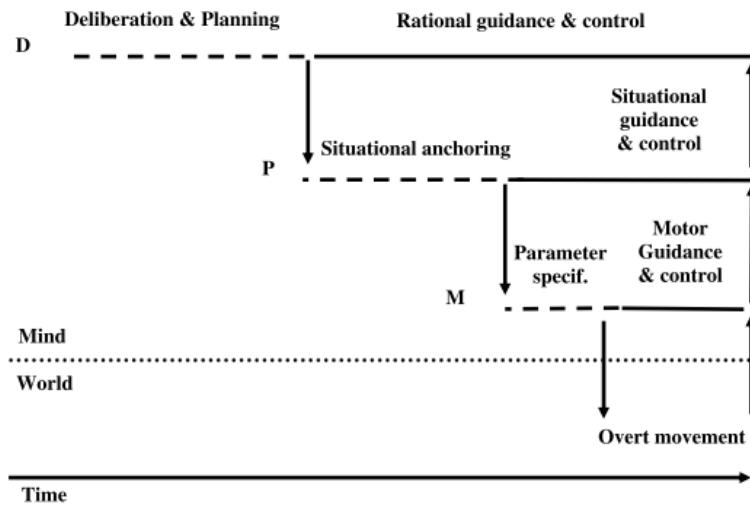


FIGURE 1.2 – Les niveaux de Pacherie mis en cascade. Chaque niveau contrôle l'action à un niveau différent.

En ce qui concerne l'action conjointe entre Hommes, Pacherie [Pacherie 2011] défend le fait que les processus liés à l'action conjointe se décomposent en trois niveaux qui ont chacun leur rôle (Fig. 1.2) :

- **Shared Distal Intention** : c'est le niveau le plus haut. Ce niveau est responsable de la formation d'une *intention jointe* et de la gestion du plan partagé.
- **Shared Proximal Intention** : ce niveau a la responsabilité d'ancrer les actions reçues du niveau supérieur dans le contexte actuel. Cela doit être fait de manière coordonnée avec les partenaires de l'action conjointe.
- **Coupled Motor Intention** : c'est le niveau le plus bas. Il est responsable des commandes moteurs des agents. Il s'occupe de la coordination spatio-temporelle au niveau le plus précis.

10 années avant que Pacherie développe ses idées concernant l'architecture trois niveaux, le domaine de la robotique autonome concevait intuitivement des architectures avec trois niveaux très similaires comme dans [Alami 1998] où l'on retrouve les niveaux :

- **Niveau décisionnel** : il est responsable de la production et la supervision du plan d'action. Il peut être comparé au niveau *Distal* de Pacherie.

- **Niveau exécutionnel** : il a la responsabilité de choisir, paramétriser et synchroniser les différentes fonctions nécessaires à l'exécution des actions venant du niveau décisionnel. Il peut être comparé au niveau *Proximal* de Pacherie.
  - **Niveau fonctionnel** : il comprend toutes les fonctions bas niveau d'action et de perception du robot. Il peut être comparé au niveau *Motor* de Pacherie.
- Cette architecture a été développée et adaptée au domaine de l'interaction Homme-robot. Récemment, nous avons présenté dans [Devin 2016] une version théorique d'une architecture adaptée à l'action conjointe Homme-robot (Fig. 1.3).

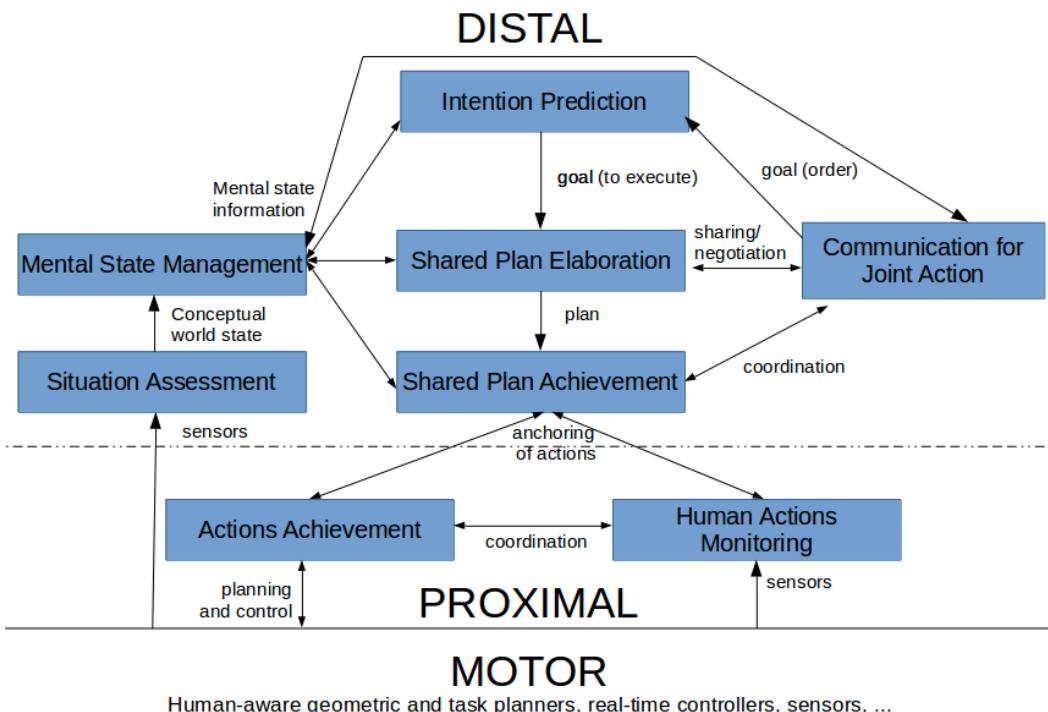


FIGURE 1.3 – Architecture récente pour l'action conjointe Homme-robot. L'architecture est organisée autour des trois niveaux définis par Pacherie.

### 1.2.2 Supervision pour l'interaction Homme-Robot

#### 1.2.2.1 Rôle du superviseur dans l'architecture globale

Le superviseur faisant l'objet de cette thèse fait partie d'une architecture globale pour l'interaction Homme-Robot développée au LAAS-CNRS. Une version simplifiée de cette architecture peut être trouvée Fig. 1.4.

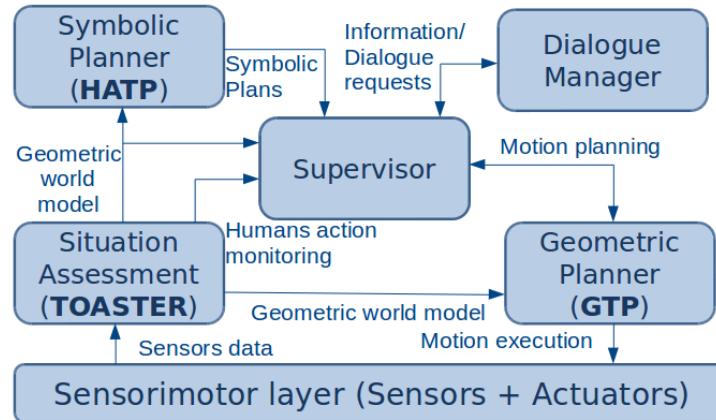


FIGURE 1.4 – Architecture globale pour l'interaction Homme-robot développée au LAAS-CNRS.

Cette architecture est composée de :

- **Un niveau sensoriomoteur** : qui contient les modules bas niveau du robot lui permettant de gérer ses capteurs et actionneurs.
- **TOASTER** : un module permettant au robot de représenter et maintenir un état du monde symbolique de son point de vue ainsi que de celui de ses partenaires.
- **GTP** : un planificateur géométrique permettant au robot d'effectuer des actions en prenant en compte le confort et la sécurité de l'Homme.
- **HATP** : un planificateur symbolique permettant au robot de calculer des plans pour lui-même et pour ses partenaires afin d'atteindre un but donné.
- **Un module de dialogue** : permettant au robot de communiquer avec l'Homme.
- **Un superviseur** : ayant la charge de superviser l'activité du robot en coordonnant les autres modules. Il choisit le but du robot, veille au bon déroulement du plan partagé, choisit quand exécuter une action et comment communiquer.

L'architecture interne du superviseur peut être trouvée Fig. 1.5. Il est composé de plusieurs modules :

- **Un gestionnaire de but** : permettant au robot de choisir quel but exécuter à chaque moment.
- **Un élaborateur de plan** : permettant au superviseur de communiquer avec HATP afin d'obtenir un plan partagé.

- **Un mainteneur de plan** : permettant au robot de suivre l'évolution du plan partagé.
- **Un estimateur d'états mentaux** : permettant au robot d'estimer les états mentaux de ses partenaires humains concernant le plan partagé.
- **Un module de décision** : permettant au robot de choisir quand exécuter une action ou donner une information.
- **Un module d'exécution d'action** : permettant au superviseur de surveiller la bonne exécution des actions par le robot.
- **Un module de communication non-verbale** : permettant de gérer pour le moment uniquement la tête du robot.

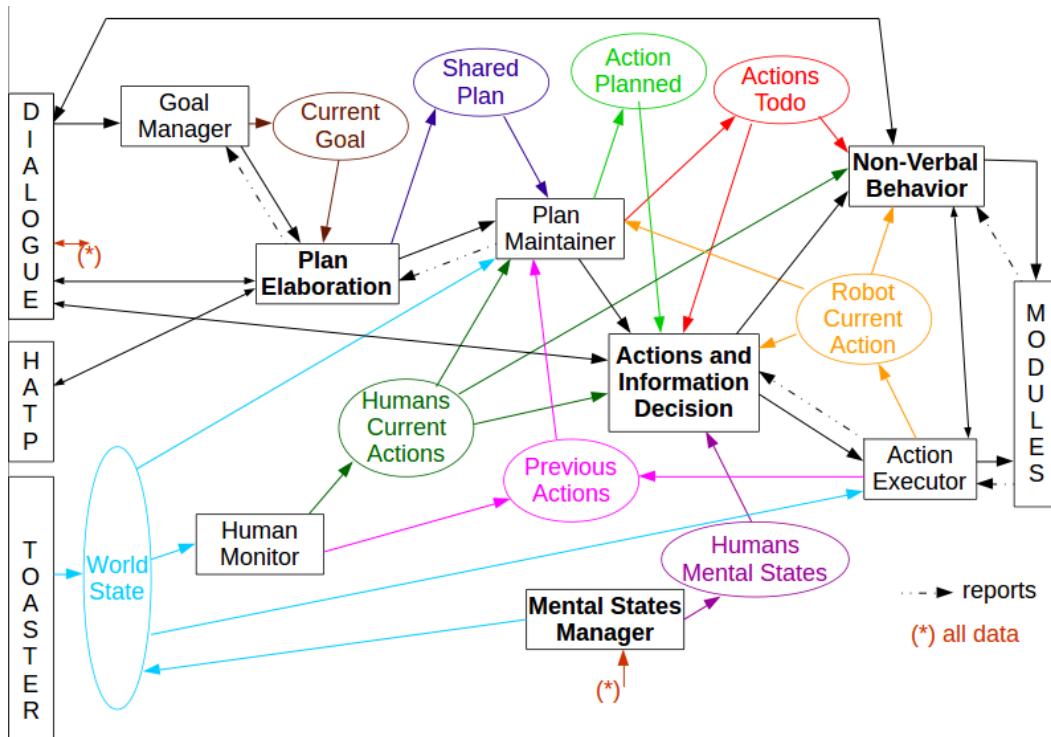


FIGURE 1.5 – Architecture interne du superviseur. Les modules en gras sont traités dans ce manuscrit.

### 1.3 Les plans partagés durant l'action conjointe Homme-Robot

#### 1.3.1 Prendre en compte les états mentaux pendant l'exécution de plans partagés

##### 1.3.1.1 Motivations et précédents travaux

Quand le robot interagit avec un Homme, il est important qu'il ne le considère pas comme un outil ou un obstacle mais qu'il prenne en compte ses sentiments et son confort et donc son point de vue notamment lors de l'exécution d'un plan partagé.

La théorie de l'esprit désigne la capacité qu'ont les humains de reconnaître et s'attribuer des états mentaux en comprenant que les autres personnes peuvent avoir des connaissances et sentiments différents des leurs et de prendre en compte ces états mentaux pendant la prise de décision. La théorie de l'esprit a beaucoup été étudiée dans les sciences sociales [Baron-Cohen 1985, Premack 1978], notamment la notion de prise de perspective qui désigne la capacité d'une personne à prendre le point de vue d'une autre personne [Tversky 1999, Flavell 1992]. Deux niveaux de prise de perspective sont définis dans [Flavell 1977]. La prise de perspective perceptuelle désigne la capacité d'une personne à comprendre que les autres ont une représentation du monde différente de la sienne (fig 1.6(b)). La prise de perspective conceptuelle désigne la capacité d'une personne à attribuer des croyances et connaissances à une autre personne (fig 1.6(b)).

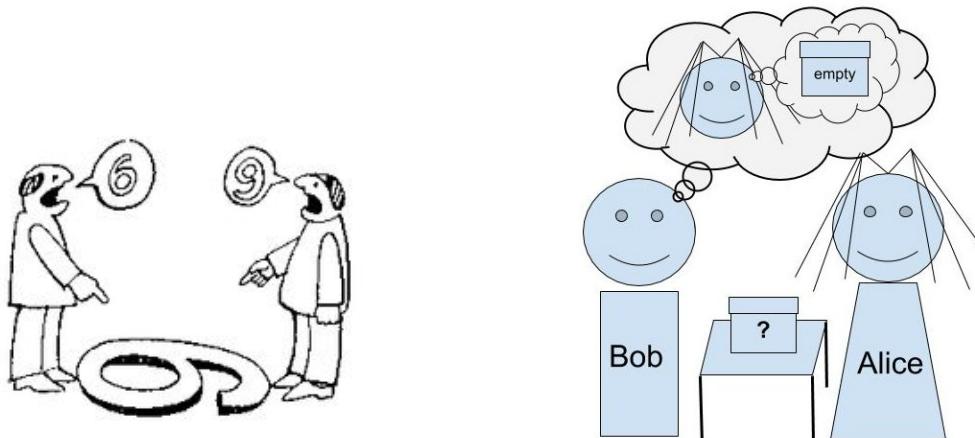


FIGURE 1.6 – Illustration de la prise de perspective perceptuelle et conceptuelle.

En robotique, plusieurs travaux ont pour but de doter le robot de capacités

liées à la théorie de l'esprit. Un des premiers travaux sur ce sujet est celui de Scassellati où il propose un modèle pour adapter deux modèles des sciences sociales [Leslie 1984, Baron-Cohen 1997] afin d'implémenter la théorie de l'esprit en robotique [Scassellati 2002]. Plusieurs travaux ont permis aux robots de se doter de capacités de prise de perspective [Berlin 2006, Hiatt 2010, Milliez 2014]. Ces capacités ont été utilisées dans plusieurs travaux visant par exemple à mieux reconnaître et comprendre les actions de l'Homme [Johnson 2005, Baker 2014, Nagai 2015] ou pour résoudre des situations ambiguës [Breazeal 2006]. Des travaux ont été réalisés pour prendre en compte le point de vue de l'homme durant l'élaboration d'un plan partagé [Warnier 2012], cependant, aucun ne concerne l'exécution de ce plan. Cette partie de la thèse a pour but de commencer à combler ce manque.

### 1.3.1.2 Estimation des états mentaux

Dans un premier temps le robot doit être capable d'étendre l'estimation des états mentaux de ses partenaires (qui concernait précédemment les connaissances sur l'environnement) aux connaissances concernant la tâche en cours et le plan partagé. Les algorithmes développés permettent au robot d'estimer les états mentaux de l'Homme concernant :

- **l'état du monde** : en plus de l'estimation des connaissances de l'Homme concernant l'état du monde observable venant de la prise de perspective (e.g. un objet est sur un autre objet) le robot est capable d'estimer les connaissances de l'Homme concernant l'état du monde non-observable (e.g. une boîte est vide ou remplie) en se basant principalement sur les effets des actions.
- **le plan partagé** : en se basant sur ce que l'Homme peut observer, le robot est capable d'estimer ses connaissances concernant les actions en cours ou passées. Grâce à cette estimation et à ses propres connaissances concernant le plan partagé, le robot est capable d'estimer les connaissances de l'Homme concernant l'état du plan (e.g. quelles actions doivent être exécutées).
- **le but** : le robot est capable d'estimer des connaissances basiques de l'Homme concernant l'état du but en cours (e.g. si il est achevé) en se basant sur ses connaissances sur l'état du monde.

### 1.3.1.3 Utilisation des états mentaux durant l'exécution du plan partagé

Une fois les états mentaux de ses partenaires estimés, le robot doit être capable de correctement les utiliser afin de communiquer durant l'exécution du plan partagé quand une différence apparaît entre les connaissances du robot et celles de l'Homme. En effet, le robot doit fournir à l'Homme les informations dont il a besoin pour réaliser la tâche sans pour autant être trop verbeux en informant l'Homme à propos de tout et n'importe quoi. Pour cela, nous avons développé plusieurs comportements pour le robot :

- en accord avec la notion de *weak achievement goal* de [Cohen 1991], si le robot détecte une différence entre ses connaissances concernant l'état du but

- en cours et celle d'un de ses partenaires, le robot va informer ce partenaire à propos de cette différence.
- lorsque le robot estime qu'un de ses partenaires doit effectuer une action, il vérifie si il estime que ce partenaire sait qu'il doit réaliser l'action. Si ce n'est pas le cas, le robot cherche la raison de cette différence de croyance et communique à ce propos.
  - lorsque le robot estime qu'un de ses partenaires pense qu'il doit effectuer une action, il vérifie si il estime également que l'action doit être réalisée. Si ce n'est pas le cas, le robot cherche la raison de cette différence de croyance et communique à ce propos.
  - quand le robot s'apprête à réaliser une action, il vérifie qu'il estime que ses partenaires sont au courant de cette action, et si ce n'est pas le cas, le robot signale son action avant d'agir.
  - finalement, comme l'estimation des connaissances de l'Homme par le robot peut être erronée, si le robot estime que l'Homme a toutes les connaissances pour réaliser une action mais que l'Homme n'agit pas, le robot va simplement demander à l'Homme de réaliser l'action et considérer que son estimation était erronée.

#### 1.3.1.4 Exemple illustratif



FIGURE 1.7 – État du monde au début de la tâche de nettoyage de table. Le robot peut atteindre le *grey book* et le *white book* tandis que l'homme peut atteindre le *white book* et le *blue book*.

Pour illustrer les bénéfices de ce travail, nous avons utilisé une tâche où un Homme et un robot doivent nettoyer une table ensemble. Pour cela, ils doivent enlever tous les objets initialement placés sur une table (Fig. 1.7), puis le robot doit balayer la table et enfin les objets doivent être remis sur la table. Le plan initialement produit par le robot pour atteindre ce but est celui Fig. 1.8.

Le robot commence à enlever le *grey book* pour le placer sur le meuble à côté de lui. Pendant ce temps, l'Homme enlève le *blue book* et s'en va (Fig. 1.10(a)).

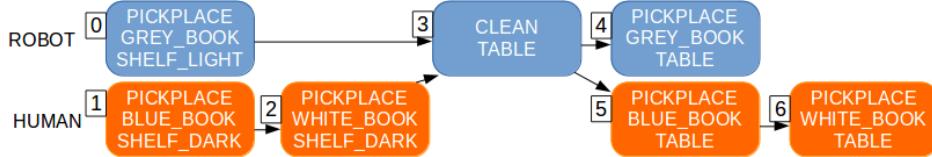


FIGURE 1.8 – Plan initial pour la tâche de nettoyage de table.

Le robot termine son action. A ce stade du plan, la prochaine action qui doit être effectuée est celle de l'Homme (enlever le *white book*). Comme l'homme ne revient pas, le robot calcule un nouveau plan où il enlève le *white book* (Fig. 1.9).

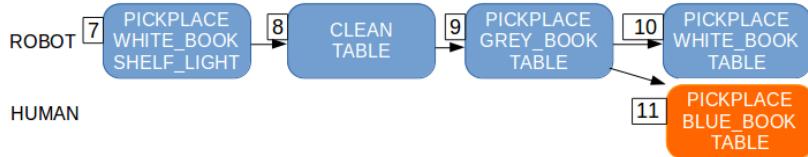


FIGURE 1.9 – Deuxième plan pour la tâche de nettoyage de table.

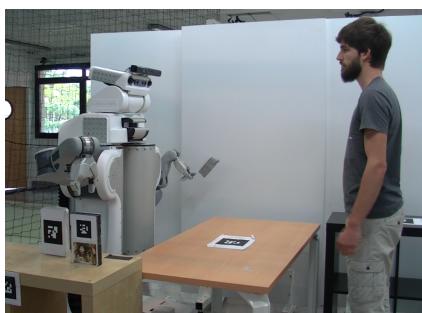
Le robot enlève le dernier livre et balaye la table (Fig. 1.10(b)). L'Homme revient alors (Fig. 1.10(c)). Comme il peut voir que le *grey book* est sur le meuble à côté du robot, le robot estime que l'Homme est capable de déduire par lui-même que le robot a fini sa première action (enlever le *grey book*). De même, comme l'homme peut voir le *white book*, le robot estime également que l'homme est au courant que le robot a enlevé ce livre. Cependant, l'Homme ne peut pas observer que la table a été balayée (on considère ici que la table n'était pas très sale et que l'effet de balayer la table n'est pas observable). Comme l'Homme a besoin de savoir que la table a été nettoyée pour remettre le livre qu'il avait enlevé, le robot va l'informer à propos de cette action ("J'ai balayé la table."). L'Homme a donc toutes les informations nécessaires pour finir la tâche (et aucune information superflue qu'il pouvait observer de lui-même), lui et le robot finissent donc la tâche avec succès (Fig. 1.10(d)).



(a) L'Homme part après avoir enlevé le premier livre.



(b) Le robot enlève le dernier livre et balaye la table.



(c) L'homme revient.



(d) L'Homme et le robot finissent la tâche avec succès.

FIGURE 1.10 – Exemple illustratif d'une tâche de nettoyage de table.

### 1.3.2 Quand prendre les décisions pendant l'élaboration et l'exécution de plans partagés ?

#### 1.3.2.1 Motivations

Quand plusieurs individus collaborent lors d'une action conjointe, et plus particulièrement lors de l'exécution d'un plan partagé, de nombreuses décisions doivent être prises. Certaines d'entre elles vont être implicites alors que d'autres vont nécessiter une négociation ou une adaptation entre les acteurs de l'action conjointe. Afin d'être un bon partenaire, le robot doit donc être capable de prendre les bonnes décisions au bon moment et de correctement communiquer à leur propos (ne pas devenir trop verbeux en communiquant à propos des décisions implicites tout en donnant les informations nécessaires au bon déroulement de la tâche). Nous avons identifié trois types de décisions que le robot doit prendre durant l'élaboration et l'exécution d'un plan partagé :

- **Quelles actions exécuter dans quel ordre ?** cela a été le sujet de plusieurs travaux dans le domaine de l'interaction Homme-Robot. Nous utiliserons pour gérer ce type de décisions, HATP, un planificateur de tâche capable de prendre en compte l'Homme [Lallement 2014].
- **Qui doit effectuer chaque action ?** cette décision est quelques fois implicite quand une seule personne est capable d'exécuter une action, mais peut,

dans certains cas, demander une négociation ou une adaptation de la part du robot. Dans les versions précédentes d'HATP, toutes ces décisions étaient prises à l'élaboration du plan. Un des objectifs de ce travail et de reporter cette décision à l'exécution quand elle n'est pas implicite afin de gagner en fluidité et en adaptabilité par rapport à l'Homme.

- **Avec quels objets effectuer une action ?** il peut arriver que deux objets soit fonctionnellement équivalents dans le cadre de la tâche. Dans ce cas, le robot prenait auparavant à l'élaboration du plan une décision arbitraire quant à l'objet à utiliser durant une action. Le deuxième objectif de ce travail et de reporter cette décision à l'exécution quand il y a plusieurs objets fonctionnellement équivalents afin de gagner en fluidité et adaptabilité par rapport à l'Homme.

### 1.3.2.2 Élaboration du plan partagé

Afin de pouvoir reporter certaines décisions à l'exécution, nous avons effectué deux changements à la façon dont HATP élabore un plan :

- Afin de reporter la décision de qui doit effectuer une action quand plusieurs agents peuvent effectuer cette action, nous avons introduit dans HATP un agent virtuel appelé *l'agent X*. Cette agent aura comme capacités l'intersection des capacités de l'Homme et du robot et aura un coût bien plus faible que les autres agents quand il réalisera une action. De cette manière, quand une action pourra être réalisée soit par l'Homme, soit par le robot, elle sera automatiquement attribuée à *l'agent X* et la décision sera prise à l'exécution.
- Nous avons également introduit ce que l'on a appelé des *objets haut niveaux*. Ces *objets haut niveaux* seront utilisés dans le plan par HATP quand deux objets fonctionnellement équivalents pourront être utilisés pour réaliser une action (par exemple CUBE\_ROUGE à la place de CUBE\_ROUGE1 ou CUBE\_ROUGE2).

### 1.3.2.3 Exécution du plan partagé

Une fois le plan élaboré, le robot doit être capable de l'exécuter en prenant les bonnes décisions au bon moment. Pour cela, grâce aux travaux antérieurs à cette thèse [Fiore 2014], le robot est capable de maintenir le plan partagé et de réagir aux actions inattendues de l'Homme. Quand le robot aura à effectuer une action du plan, il choisira en priorité une action qui lui est allouée par rapport à une action allouée à *l'agent X* de manière à laisser le choix le plus longtemps possible à l'Homme d'effectuer cette action ou non.

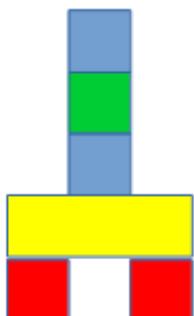
Quand le robot devra choisir qui doit réaliser une action allouée à *l'agent X*, il vérifiera dans un premier temps quels sont les agents réellement disponibles pour effectuer cette action. Si le robot est le seul à pouvoir réaliser l'action (e.g. l'homme est déjà en train d'effectuer une autre action), il prendra l'initiative de réaliser l'action. Si l'Homme et le robot peuvent tous les deux réaliser l'action, le robot aura alors deux différents modes possibles :

- **Le mode négociation** : où le robot demande à l'homme si il veut réaliser l'action et agit (ou non) en fonction de sa réponse.
- **Le mode adaptation** : où le robot attend un temps court de voir si l'homme prend l'initiative de réaliser l'action, et, si ce n'est pas le cas, prend lui-même l'initiative de la réaliser.

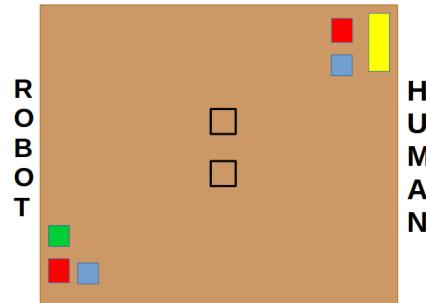
Une fois une action allouée par le robot, il calcule un nouveau plan pour vérifier que cette allocation n'a pas d'autres implications dans le plan.

Finalement, quand le robot doit réaliser une action comportant un *objet haut niveau*, le robot va reporter la décision au dernier moment possible pour laisser plus de latitude à l'Homme. Pour prendre la décision de quel objet utiliser, le robot pourra utiliser des coûts prenant en compte l'Homme tels que la distance entre les agents et les différents objets. L'exécution de l'action par le robot se fera en boucle fermée et en surveillant l'activité de l'Homme de manière à pouvoir changer de décision si l'Homme prend une initiative en conflit avec la décision précédente.

#### 1.3.2.4 Exemple illustratif



(a) But de la tâche (vue de côté).



(b) Un possible état de départ (vue de haut).

FIGURE 1.11 – Description de la tâche de construction de blocs. L'Homme et le robot doivent construire une pile ensemble.

Pour illustrer les bénéfices de ce travail, nous avons utilisé une tâche inspirée de celle présentée dans [Clodic 2014]. Un Homme et un robot doivent réaliser une construction avec des blocs colorés comme représenté Fig. 1.11(a). Au début de la tâche, l'Homme et le robot ont chacun plusieurs blocs de couleur à leur disposition comme par exemple Fig. 1.11(b). Deux emplacements identiques sont placés au centre de la table pour indiquer ou mettre les deux premiers cubes rouges.

Le plan produit initialement par HATP pour réaliser la tâche peut être trouvé Fig. 1.12(a). Le robot attrape le cube rouge à sa disposition et choisit de le placer sur l'emplacement à sa droite (Fig. 1.12(b)). Cependant, l'Homme prend son cube rouge et choisit de le placer sur le même emplacement que celui choisi par le robot (Fig. 1.12(c)). Le robot interrompt son action et s'adapte en plaçant son cube sur l'autre emplacement (Fig. 1.12(d)). L'homme pose alors le bâton jaune sur les cubes rouges. Dans cet exemple, le robot utilise le mode **négociation** pour choisir

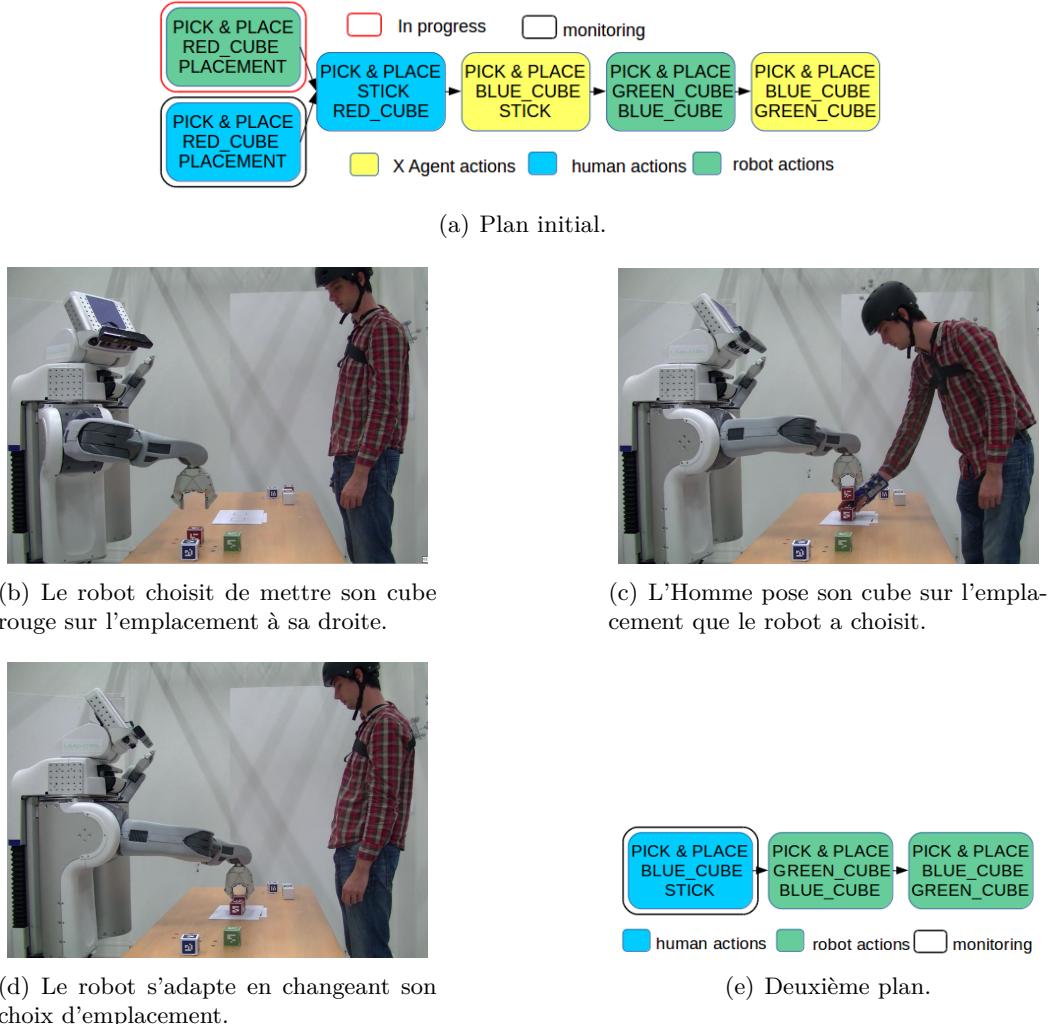


FIGURE 1.12 – Exemple illustratif d'une tâche de construction de blocs.

qui va mettre le premier cube bleu. Le robot demande donc à l'Homme si il veut poser le cube bleu ("Voulez-vous poser le cube bleu ?"). L'Homme répond oui, le robot calcule donc un nouveau plan où il posera le second cube bleu Fig. 1.12(e). Finalement, l'Homme et le robot effectuent leurs dernières actions et réalisent la tâche avec succès.

### 1.3.3 Évaluation du système

#### 1.3.3.1 Tâche et conditions

Afin d'évaluer le nouveau système développé concernant la gestion des plans partagés par le robot, nous avons développé une tâche d'inventaire. Dans cette tâche, l'Homme et le robot doivent scanner différents cubes de couleur et les ranger dans une boîte de même couleur. Au début de la tâche chaque agent a une pile de cubes de différentes couleurs à laquelle seulement lui peut accéder. Ces piles contiennent des cubes bleus, verts et rouges. Pour que les cubes soit scannés, les agents doivent les poser un par un sur une des deux zones de scan sur la table devant le robot (voir Fig. 1.13). Une fois un cube sur une zone, le robot peut le scanner en orientant sa tête vers le cube et en allumant une lumière rouge en direction du cube (voir Fig. 1.15). Une fois un cube scanné, il peut être rangé dans une boîte de la même couleur. Le robot a accès à une boîte bleue et à une boîte rouge tandis que l'Homme a accès à une boîte verte et à une boîte rouge (voir Fig. 1.13). Cette tâche comporte deux particularités intéressantes pour notre système :

- Comme la pile de l'homme et ses boîtes sont situées dans des pièces différentes que celle du robot (voir Fig. 1.13), si le robot scanne un cube quand l'Homme est parti chercher ou ranger un cube, l'Homme ne pourra pas savoir que le cube a été scanné sauf si le robot l'en informe (pas d'effets visibles).
- La répartition des boîtes entre les agents fait que seul le robot peut ranger les cubes bleus, seul l'Homme peut ranger les cubes verts mais qu'ils peuvent tous les deux ranger les cubes rouges.

Nous avons évalué notre système en simulation et lors d'une étude utilisateur. Pour faire cela, nous avons comparé 4 différentes conditions :

- avec le système original, appelé **système de référence (RS)**, où toutes les décisions du robot sont prises durant l'élaboration du plan et sans estimation des états mentaux de l'Homme :
- **RS-NONE mode** : le robot ne verbalise rien (sauf en cas de stricte nécessité).
- **RS-ALL mode** : le robot informe à propos de toutes les actions qu'il doit faire et que l'homme doit réaliser ainsi qu'à propos de toutes les actions manquées par l'Homme.
- avec le nouveau système développé présenté précédemment (**NS**) :
- **NS-N mode** : le robot utilise le mode **négociation** pour prendre une décision concernant les actions de *l'agent X*.
- **NS-A mode** : le robot utilise le mode **adaptation** pour prendre une décision concernant les actions de *l'agent X*.

#### 1.3.3.2 Évaluation en simulation

Pour évaluer notre système en simulation, nous avons fait tourner la tâche avec différents états de départ ou les piles des agents étaient aléatoirement composées. Durant ces simulations, le robot était confronté à plusieurs types d'Hommes simu-

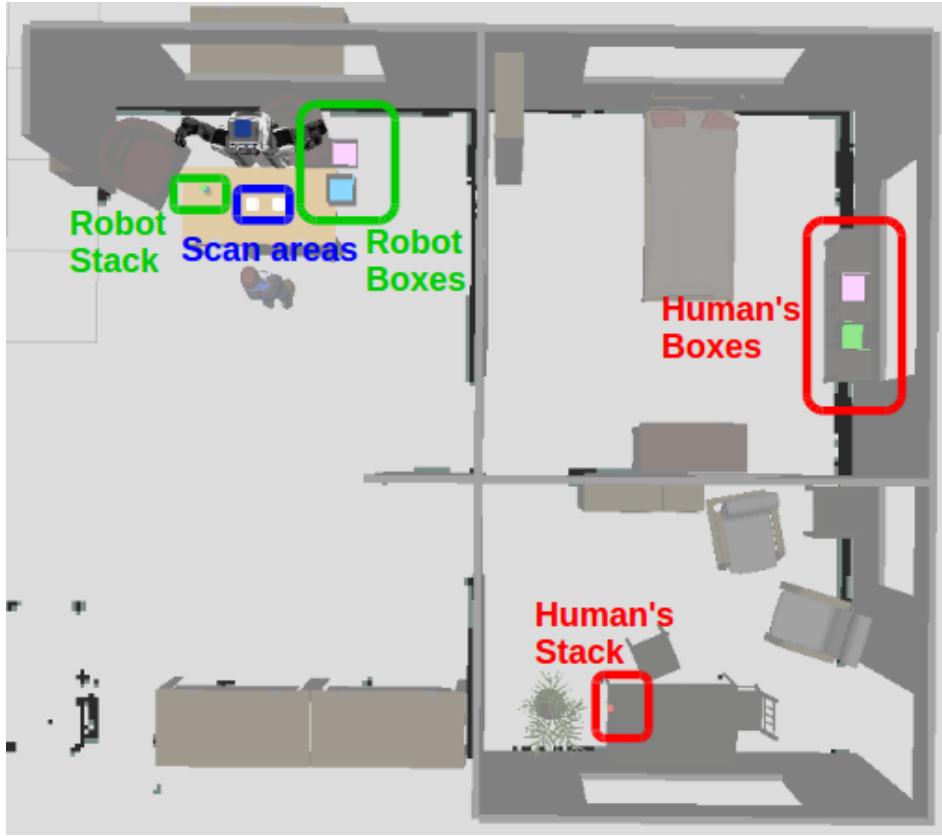


FIGURE 1.13 – Etat initial pour la tâche d'inventaire. L'Homme et le robot doivent prendre les cubes de leur pile pour les mettre sur une zone de scan. Puis, le robot doit scanner le cube et enfin chaque cube doit être rangé dans une boîte de même couleur. L'Homme a accès à une boîte verte et à une boîte rouge tandis que le robot a accès à une boîte bleue et à une boîte rouge.

lés :

- *l'Homme "aimable" (cas K)* : qui adapte son comportement à ce que verbalise le robot. Concernant les cubes rouges, il peut choisir de ne jamais les ranger (**lazy-K**), les ranger systématiquement (**hurry-K**) ou les ranger avec une probabilité de 50% (**50%-K**)
- *l'Homme "têtu" (cas S)* : qui n'adapte pas son comportement à ce que verbalise le robot. Concernant les cubes rouges, il peut choisir de ne jamais les ranger (**lazy-S**), les ranger systématiquement (**hurry-S**) ou les ranger avec une probabilité de 50% (**50%-S**)

Dans tous les cas, l'Homme participe activement au dépôt des cubes de sa pile sur les zones de scan et au rangement des cubes verts et répond aux questions posées par le robot.

Les données mesurées durant ces simulations sont :

- *le nombre d'interactions verbales* : entre l'Homme et le robot (information donnée par le robot ou question posée), Tab. 1.1.

- *le nombre de décisions incompatibles* : les deux acteurs prennent la même décision concernant une action (les deux essayent de la réaliser ou de ne pas la réaliser), Tab. 1.2.
- *le temps d'exécution total* : pour réaliser la tâche, Fig. 1.14.

	<b>RS-NONE</b>	<b>RS-ALL</b>	<b>NS-N</b>	<b>NS-A</b>
<b>50%-K</b>	2.4 (0.84)	20.7 (1.34)	3.4 (1.51)	2 (1.33)
<b>hurry-K</b>	1.8 (0.79)	21.1 (2.08)	1.9 (1.10)	2.2 (1.13)
<b>lazy-K</b>	3.0 (1.33)	21 (1.56)	3.3 (1.42)	1.6 (1.17)
<b>50%-S</b>	2.5 (1.43)	23.9 (1.59)	3.3 (1.49)	1.7 (0.95)
<b>hurry-S</b>	1.5 (0.97)	20.9 (1.29)	2.4 (1.89)	1.9 (0.99)
<b>lazy-S</b>	3.2 (0.92)	25.2 (1.55)	2.8 (1.68)	1.8 (1.14)

TABLE 1.1 – **Nombre d’interactions verbales** : questions posées par le robot dans le mode négociation et nombre d’informations verbalisées. Ces résultats correspondent à la moyenne sur 10 essais et leur déviation standard associée.

- Plusieurs choses peuvent être observées par rapport aux résultats obtenus :
- le mode **RS-NONE** est celui comportant le plus de décisions incompatibles (du fait que le robot ne communique et de s’adapte pas par rapport aux cubes rouges et aux choix des zones de scan). Ce mode comporte également les plus grands temps d’exécution, plus spécialement dans le cas de l’Homme "têtu" car le robot perd du temps à attendre qu’il exécute des actions qu’il ne veut pas réaliser ou à attendre que l’Homme range un cube dont il ne sait pas qu’il a été scanné.
  - comme attendu, le mode **RS-ALL** est celui avec le plus d’interactions verbales. Cependant, ces interactions verbales ne suffisent pas à supprimer toutes les décisions incompatibles, surtout dans le cas de l’homme "têtu" où le temps d’exécution est également plus élevé.
  - on peut voir que les performances du **nouveau système** sont globalement meilleures que celles de l’ancien système. En effet pour beaucoup moins d’informations verbalisées, il permet de supprimer les décisions incompatibles et de réduire le temps d’exécution dans le cas de l’Homme "têtu". Le mode **adaptation** obtient les mêmes résultats que le mode **négociation** mais avec moins d’interactions verbales.

### 1.3.3.3 Étude utilisateur

**Adaptation de la tâche pour l’étude utilisateur :** Avant de réaliser l’étude utilisateur, nous avons effectué quelques pré-tests qui nous ont permis d’identifier plusieurs problèmes et d’y remédier avec des adaptations de la tâche :

- **introduction d’une cassette rouge** : afin d’assurer qu’il y ait forcément une prise de décision par rapport à un objet rouge (de temps en temps la configuration faisait qu’aucune décision n’était nécessaire), nous avons ajouté une cassette rouge qui doit être scannée et rangée une fois que tous les cubes

	<b>RS-NONE</b>	<b>RS-ALL</b>	<b>NS-N</b>	<b>NS-A</b>
<b>50%-K</b>	2.9 (0.99)	0.9 (0.57)	0.6 (0.7)	0.3 (0.48)
<b>hurry-K</b>	2.5 (0.97)	1.0 (0.94)	0.6 (0.52)	0.4 (0.52)
<b>lazy-K</b>	3.5 (1.08)	0.8 (0.63)	0.5 (0.7)	0.5 (0.53)
<b>50%-S</b>	2.9 (1.45)	1.9 (0.99)	0.6 (0.52)	0.5 (0.97)
<b>hurry-S</b>	2.3 (1.34)	1.0 (0.82)	0.5 (0.53)	0.4 (0.52)
<b>lazy-S</b>	3.5 (0.97)	2.6 (1.84)	0.3 (0.67)	0.4 (0.52)

TABLE 1.2 – **Nombre de décisions incompatibles** : les deux acteurs prennent la même décision concernant une action (les deux essayent de la réaliser ou de ne pas la réaliser). Ces résultats correspondent à la moyenne sur 10 essais et leur déviation standard associée.

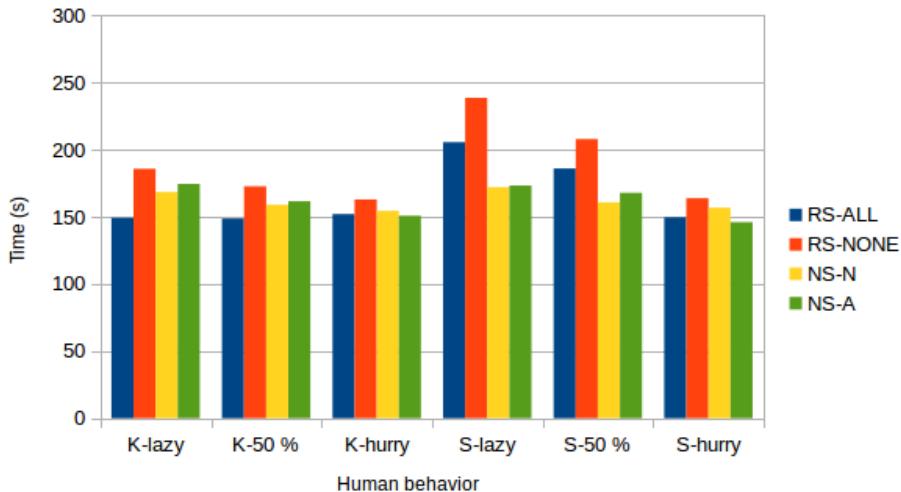


FIGURE 1.14 – Temps en secondes nécessité pour chaque système pour réaliser la tâche dans chaque condition (moyennes sur 10 essais).

ont été rangés. L'Homme et le robot ont chacun initialement une cassette rouge mais une seule doit être scannée et rangée.

- **Tâche de distraction** : afin d'être sûrs d'obtenir un manque de connaissance à un moment de la tâche (de temps en temps l'homme ne s'absentait jamais lors d'une action de scan), nous avons rajouté une tâche de construction avec des Légos pour le sujet à un moment de la tâche dans un lieu où il ne peut pas voir le robot.

**Questionnaire et protocole :** 21 sujets (8 femmes et 13 hommes) ont interagi avec le robot pour réaliser la tâche dans les quatre conditions décrites précédemment. L'ordre de ces conditions et les compositions des piles des agents étaient aléatoires. A leur arrivée, les participants étaient introduits à l'environnement de travail et au robot par l'expérimentateur. Ensuite, les participants avaient à lire

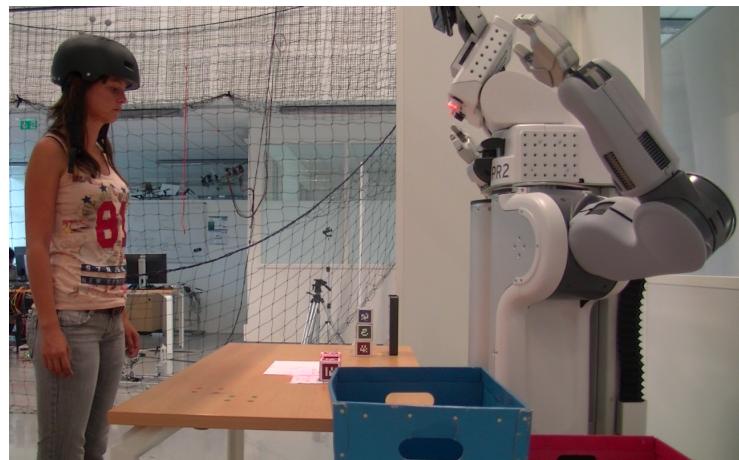


FIGURE 1.15 – Le robot PR2 interagissant avec un sujet pour réaliser la tâche. Le robot scanne un objet avant de le ranger.

les consignes de la tâche et l'expérimentateur vérifiait leur bonne compréhension. Les participants réalisaient une rapide tâche de familiarisation avant de réaliser la vraie tâche. Après chaque interaction avec le robot (pour chaque condition), les participants avaient à remplir un questionnaire leur permettant d'évaluer le comportement du robot. Comme nous n'avons pas trouvé dans la littérature existante de questionnaires permettant d'évaluer la prise de décision haut niveau d'un robot lors d'une tâche de collaboration avec l'Homme, nous avons conçu ce questionnaire en nous basant sur le modèle d'expérience utilisateur UX [Mahlke 2008] et en ajoutant des dimensions spécifiques à la prise de décision. Ce questionnaire est composé de plusieurs dimensions :

- **Dimension de collaboration**, basée sur [Weistroffer 2014] et permettant d'évaluer la perception de l'utilité et de l'utilisabilité du robot [Davis 1989].
- **Dimension d'interaction**, basée sur [Lallemand 2015] et permettant d'évaluer l'intention d'utilisation [Davis 1989].
- **Dimension de perception du robot**, basée sur le questionnaire Godspeed [Bartneck 2009] et permettant d'évaluer comment le sujet perçoit le robot en général [Hassenzahl 2003].
- **Dimension émotions**, reprise de l'AffectButton [Broekens 2013] et permettant d'évaluer les émotions du sujet lors de l'interaction.
- **Dimension verbale** permettant d'évaluer comment le sujet a perçu les interactions verbales avec le robot.
- **Dimension d'action** permettant d'évaluer comment le sujet a perçu la prise de décision du robot par rapport au choix d'exécution des actions.

Ces dimensions étaient évaluées grâce à des questions où le sujet devait se placer sur une échelle de 100, sauf pour la dimension émotion où le sujet avait à choisir entre plusieurs smileys.

**Hypothèses :** Nous avons émis plusieurs hypothèses avant l'étude :

- **Hypothèse 1 :** le nouveau système sera préféré par les utilisateurs à l'ancien système.
- **Hypothèse 2 :** concernant le nouveau système, au contraire des résultats de simulation, le mode négociation sera préféré par les utilisateurs au mode adaptation.

**Résultats :** La cohérence interne de questionnaire a été vérifiée à la suite de cette étude (alpha de Cronbach supérieur à 0,7 pour toutes les dimensions du questionnaire). Concernant les scores des différentes conditions, les résultats totaux du questionnaire peuvent être trouvés en Fig 1.16.

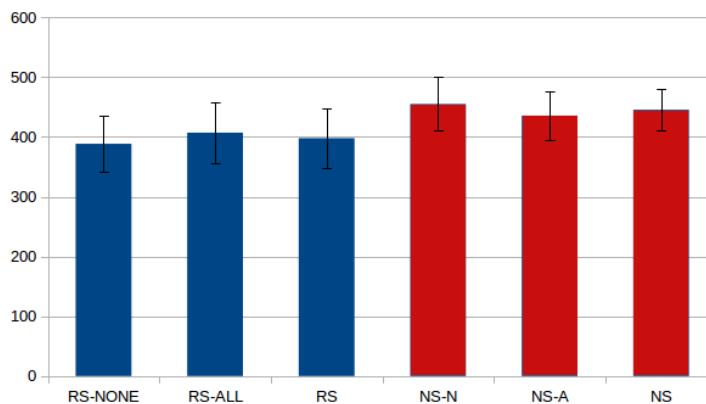


FIGURE 1.16 – Scores totaux du questionnaire utilisateur. Addition des scores de toutes les dimensions précédemment remis sur une échelle de 100.

Les scores du nouveau système (NS) ont été trouvés significativement plus élevés ( $p < 0.05$ ) que ceux de l'ancien système (RS). Cela permet donc de vérifier la première hypothèse comme quoi le nouveau système a été préféré des sujets. Concernant le nouveau système, si l'on regarde la dimension verbale du questionnaire, le score de la condition **négociation** a été trouvé significativement plus élevé que celui de la condition **adaptation** ( $p < 0.05$ ). Il n'y a pas eu de différence significative concernant les autres dimensions. Comme la seule différence entre ces deux modes consiste à poser ou non une question quand il y avait une décision à prendre concernant un objet rouge (comportement verbal), nous pouvons donc considérer la seconde hypothèse comme validée également.

#### 1.3.3.4 Conclusion

L'évaluation du système en simulation et lors d'une étude utilisateur a permis de montrer que le nouveau système développé a de meilleures performances et une meilleure appréciation par l'utilisateur que l'ancien système. Concernant les deux modes possible du nouveau système, des utilisateurs naïfs comme ceux de l'étude

utilisateur préfère le mode **négociation**. Cependant, pour des utilisateurs plus experts, le mode **adaptation** a montré de meilleurs résultats en simulation. L'étude utilisateur nous a également permis de développer et valider un questionnaire permettant d'évaluer la prise de décision haut niveau du robot lors d'une tâche de collaboration avec l'Homme.

## 1.4 Autres contributions à l'action conjointe Homme-Robot

### 1.4.1 Communication non-verbale : qu'est ce que le robot doit faire avec sa tête ?

#### 1.4.1.1 Motivations et précédents travaux

Pour communiquer entre eux quant ils collaborent sans être trop verbeux, les hommes utilisent fréquemment la communication non-verbale [Ekman 1969, DePaulo 1992]. Durant l'action conjointe Homme-Robot, le robot doit également être capable de communiquer à son partenaire toutes les informations dont il a besoin sans être trop intrusif. Pour cela, il doit donc être capable d'avoir un comportement non-verbal adapté à l'action conjointe. La communication non-verbale vient de multiples sources (expression faciales [LaBarre 1947], postures [Mehrabian 1969], regard [Mutlu 2009a], etc...). Dans cette thèse, nous nous sommes concentré sur l'utilisation de la tête du robot, remplaçant les signaux donnés par le regard en l'absence de pupilles pour le robot [Imai 2002].

Les sciences sociales ont permis de déterminer plusieurs utilisations du regard durant l'action conjointe entre Hommes :

- **Aide au dialogue et à la prise de tour** : le regard est très utilisé lors du dialogue [Argyle 1976] et plus spécifiquement pour signaler les changements d'orateur [Kendon 1967].
- **Aide à la compréhension des actions** : les acteurs d'une action conjointe vont agir différemment que lorsqu'ils agissent seul [Becchio 2010, Vesper 2010]. Plus spécifiquement, l'utilisation du regard lors d'une action va permettre aux partenaires de mieux interpréter les intentions de l'acteur [Castiello 2003, Pierno 2006].
- **Aide à la compréhension des états mentaux** : l'observation du regard du partenaire permet de mieux prendre sa perspective afin de mieux estimer ses connaissances [Furlanetto 2013].

En robotique, plusieurs études ont montré l'intérêt du comportement non-verbal du robot [Furlanetto 2013, Häring 2012]. Beaucoup de travaux se sont concentrés sur l'utilisation de la tête lors du dialogue [Mutlu 2009b, Boucher 2010, Skantze 2014]. Seuls quelques uns portent sur l'utilisation du regard durant l'action conjointe et ont montré qu'un bon comportement de la part du robot aide à la coordination lors de l'exécution du plan partagé [Lallée 2013] et à la prise de décision de l'Homme [Boucher 2012].

#### 1.4.1.2 Réflexion concernant les signaux et comportements nécessaires

Sur la base d'une étude bibliographique des comportements humains et des travaux sur la tête du robot, nous avons identifié ce que nous pensons être des composants nécessaires à un bon comportement de la tête du robot lors de l'action conjointe :



(a) Début de la tâche. Le cube bleu et le cube vert sont accessibles par l'Homme et les cubes noir et rouge sont accessibles par le robot.

(b) Fin de la tâche. La pile doit être construite dans un ordre précis (rouge, noir, bleu, vert).

FIGURE 1.17 – Tâche utilisée dans l'étude utilisateur en ligne. Dans cette tâche, l'Homme et le robot doivent construire une pile de cubes colorés.

- **Lorsque le robot agit** : lors de ses actions, le robot doit utiliser sa tête à la fois pour la bonne réalisation de l'action d'un point de vue fonctionnel (présence de caméras à l'intérieur de la tête) mais également pour indiquer à ses partenaires ce qu'il fait et ce qu'il va faire ensuite.
- **Lorsque le robot parle** : lors d'un dialogue, il est important pour le robot de regarder l'homme au bon moment ainsi que les objets dont il parle.
- **Le robot observe** : le robot doit se servir de sa tête pour montrer son intérêt et sa compréhension des actions de l'Homme.
- **Le robot se coordonne** : le robot doit fournir les signaux appropriés et nécessaires au bon déroulement du plan partagé.

#### 1.4.1.3 Étude approfondie de certains signaux

Nous avons étudié dans plus de détails certains composants des comportements définis précédemment. Pour faire cela, nous avons mené une étude utilisateur en ligne à base de vidéos. Dans cette étude, nous avons demandé à 59 personnes (30 femmes et 29 hommes) de regarder plusieurs vidéos courtes où le comportement de la tête du robot changeait et d'évaluer ces comportements grâce à un petit questionnaire. Dans ces vidéos, l'Homme et le robot avaient à construire une pile de cubes colorés (comme illustré Fig. 1.17).

Les comportements testés et les résultats obtenus sont les suivants :

- **Anticipation des actions du robot** : nous avons comparé un comportement du robot où il anticipait sa prochaine action avec sa tête (il regarde le cube à prendre avant de commencer son action) au même comportement sans cette anticipation. Nous n'avons pas trouvé de différence significative entre ces deux comportements. En effet, certains des sujets étaient perturbés par le fait que le robot regarde le cube avant d'agir et d'autres n'ont pas vu la différence. Une possible explication pour cela est que la tâche ne demandait pas d'anticipation de la part du robot car les deux participants savaient quelle action était nécessaire à chaque moment (ordre de la pile prédefini).

- **Suivre l'activité de l'homme** : nous avons comparé différents moyens pour le robot de suivre avec sa tête l'activité de l'Homme. Dans la première condition, le robot regardait la main de l'homme dès qu'elle était en mouvement et la tête sinon. Dans la seconde, le robot regardait la main de l'Homme quand elle était dans une zone de travail définie au dessus de la table et la tête sinon. Finalement, dans la dernière condition, le robot regardait la main de l'Homme quand elle était en mouvement et dans la zone de travail et la tête sinon. Cette dernière condition a été significativement préférée aux deux autres par les sujets.
- **Montrer la compréhension des actions de l'Homme** : nous avons comparé un comportement où le robot marquait un arrêt avec sa tête quand l'Homme réalisait une action de manière à montrer qu'il avait détecté l'action à une condition sans cet arrêt. Nous n'avons pas trouvé de différence significative entre ces deux conditions, les sujets ayant du mal à trouver les différences entre les deux vidéos.
- **Gérer l'inaction de l'Homme** : dans ces vidéos, l'Homme mettait du temps à réaliser une de ses actions. Nous avons comparé trois différentes réaction de la part du robot. Dans la première, le robot ne changeait pas son comportement de base face à cette inaction. Dans la seconde, le robot donnait un signal à l'Homme avec sa tête en regardant le cube que l'Homme devait prendre. Dans la dernière, le robot donnait un signal similaire mais cette fois ci regardait le cube de l'Homme puis la pile. Les deux conditions où le robot donnait un signal à l'Homme ont été notées significativement mieux que celle sans signal montrant l'importance du signal du robot. Aucune différence n'a été trouvée entre les deux différents signaux.
- **Aide à la prise de tour** : nous avons comparé différentes manières pour le robot de gérer le changement d'acteur dans la tâche (passage d'une action du robot à une action de l'Homme). Dans deux conditions, le robot ne donnait pas de signal particulier à l'Homme. Il regardait simplement l'Homme soit à la fin de son action dans une condition, soit après s'être retiré de son action dans l'autre condition. Dans les deux autres conditions, le robot regardait le cube que l'Homme devait poser avant de regarder l'Homme. Comme pour les deux précédentes conditions, le robot faisait cela à la fin de son action dans une condition et après s'être retiré dans l'autre condition. Les deux conditions où le robot regardait le cube de l'Homme ont été trouvées significativement meilleures que les deux autres, montrant l'intérêt du signal du robot. Aucune différence n'a été trouvée concernant le timing du signal (avant ou après le retrait).
- **Choisir un objet d'attention** : dans le dernier scénario, l'Homme commençait à prendre un cube pendant que le robot était toujours en train de poser le sien. Dans une condition, le robot continuait son action sans regarder l'Homme. Dans la seconde condition, le robot regardait l'Homme mais sans interrompre sa propre action. Dans la dernière condition, le robot interrompait son action pour regarder celle de l'Homme. La condition où le

robot ne regarde pas l'Homme a été trouvée significativement moins bonne que les deux autres. Aucune différence n'a été trouvée entre les deux autres conditions. Cela montre l'importance pour le robot de regarder l'action de l'Homme même si il doit pour cela interrompre sa propre action.

#### 1.4.1.4 Proposition d'architecture pour le comportement de la tête du robot

A partir de l'étude bibliographique et des résultats de l'étude présentée précédemment, nous avons proposé une architecture pour gérer la tête du robot. Cette architecture peut être trouvée Fig. 1.18.

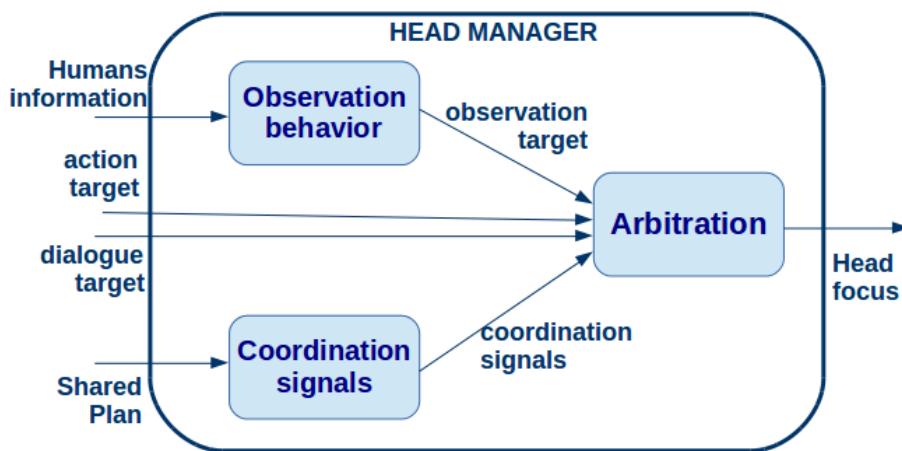


FIGURE 1.18 – Architecture pour gérer la tête du robot. Un module d'arbitrage choisit où le robot doit regarder en se basant sur plusieurs comportements et signaux produits par des modules en amont.

Un premier module permet au robot de générer un comportement pour montrer sa compréhension de l'activité de l'Homme. Basé sur les résultats de l'étude précédente, nous proposons d'implémenter un comportement où le robot regarde successivement la tête et la main de l'Homme en se basant sur le mouvement de la main et sa position (dans ou en dehors de zones de travail). Nous proposons également d'implémenter un comportement qui permet au robot de répondre aux regards de l'Homme (le robot regarde l'Homme si il le regarde et regarde l'objet de l'attention de l'Homme si l'Homme regarde fixement un objet).

En entrée de l'architecture proposée, nous trouvons des points d'intérêt venant du module d'exécution d'action du robot et du module de dialogue. Ces deux modules fournissent tous les deux l'objet ou la personne la plus pertinente à regarder en fonction de l'action du robot et de la conversation en cours.

Un autre module permet de créer des signaux à donner à l'Homme concernant l'exécution du plan partagé. Nous proposons d'implémenter les deux signaux étudiés précédemment (signal quand l'Homme n'agit pas et signal d'aide à la prise de tour).

Finalement, un module d'arbitrage permet de choisir entre les différents comportements et signaux générés par les autres modules en se basant sur ce que fait le robot et les différentes priorités des signaux et comportements.

### 1.4.2 Combiner apprentissage et planification

#### 1.4.2.1 Motivations et travaux précédents

Concernant la prise de décision en robotique, on retrouve deux grandes écoles de pensée qui ont chacune leurs avantages et désavantages : l'apprentissage et les processus déterministes (ou planification). L'apprentissage est généralement "peu coûteux" au sens où une décision est prise rapidement et une solution va toujours être proposée quelque soit le problème. Cependant, la phase d'apprentissage requiert une grande quantité de données et/ou une longue période d'apprentissage durant laquelle le robot va produire des comportements inconsistants et perturbants pour l'utilisateur humain. La planification va être plus lente à prendre une décision, particulièrement dans le cas d'un environnement ou d'une tâche complexe, mais va pouvoir prendre en compte des règles sociales et assurer la validité de la solution proposée dans son ensemble. L'idée de ce travail est de combiner ces deux techniques dans le contexte de la prise de décision pour l'interaction Homme-Robot.

Ces deux écoles de pensées sont inspirées des différents comportements des mammifères et de l'Homme : le comportement *dirigé vers un but* pour la planification et le comportement *habituel* pour l'apprentissage [Dickinson 1985]. Différentes études ont été menées en neuroscience pour trouver comment alterner entre ces comportements [Pezzulo 2013, Lesaint 2014, Viejo 2015]. En robotique, de nombreux travaux ont été réalisés en planification [Ingrand 2014] et en apprentissage [Kober 2011, Martins 2010, Stulp 2013] mais peu d'entre eux se concentrent sur comment combiner ces approches.

#### 1.4.2.2 Présentations des différents experts

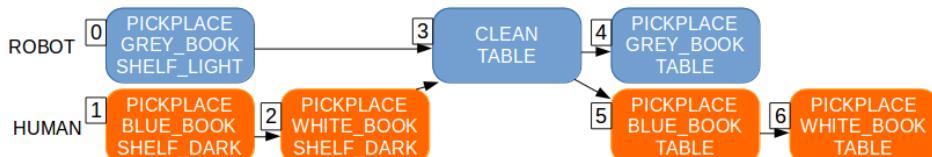


FIGURE 1.19 – Un exemple de plan produit par HATP. Ce plan permet à un Homme et à un robot de nettoyer une table en enlevant tous les objets dessus, la nettoyant puis replaçant tous les objets enlevés précédemment.

Dans le travail présenté dans cette thèse, deux experts ont été utilisés pour modéliser les deux comportements évoqués précédemment :

- Le comportement *dirigé vers un but* est fourni par HATP [Lallemand 2014], un planificateur HTN conçu pour le contexte de l'interaction Homme-robot. HATP prend en compte les préconditions et effets des différentes actions possibles pour construire un plan qui permet d'atteindre un but précis depuis un contexte donné (e.g. Fig. 1.19). HATP permet de calculer un plan complet qui permet d'atteindre un but donné et qui prend en compte des

coûts concernant l'Homme. Cependant, il ne permettra pas d'apprendre du comportement de l'Homme en direct, les coûts étant codés à l'avance. Son temps de décision sera plus lent que celui de l'autre expert mais ne nécessite pas de période d'apprentissage.

- Le comportement *habituel* est produit par un algorithme d'apprentissage par renforcement sans modèle [Renaudo 2014] qui permet d'apprendre une action à exécuter pour chaque état possible en se basant sur un principe de récompense. Cet algorithme est implémenté comme un réseau neuronal (voir Fig. 1.20). Cet algorithme permet de toujours proposer rapidement une action à exécuter par le robot. Cependant une longue phase d'apprentissage est nécessaire pendant laquelle le robot aura un comportement inconsistant au début et à chaque changement de la tâche.

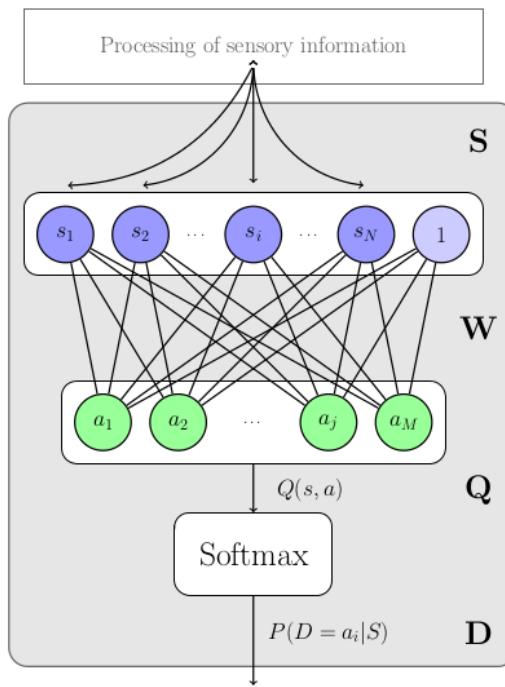


FIGURE 1.20 – L'expert du comportement habituel est un algorithme d'apprentissage implanté comme un réseau neuronal. Il reçoit en entrée un état  $S$  qui est projeté sur un neurone d'entrée  $s_i$  définissant une activité d'entrée. L'activité est propagée grâce aux poids du réseau neuronal  $W$  pour générer une activité sur le niveau d'action. Cette activité correspond à la valeur  $Q(S, a_j)$  et est convertie en une probabilité de distribution permettant à l'expert de prendre une décision  $D$  sur la prochaine action à exécuter.

### 1.4.2.3 Première architecture : une preuve de concept

**Architecture :** La première architecture développée pour combiner les deux experts peut être trouvée Fig. 1.21. Dans cette architecture les deux experts sont placés en parallèle. Le module d'évaluation de la situation prend les données de la perception et maintient l'état du monde courant. Cet état du monde est utilisé par la supervision pour calculer la récompense et par les experts pour prendre une décision. Les propositions des deux experts sont envoyées au méta-contrôleur qui décide de l'action à exécuter (de manière aléatoire). Le superviseur exécute l'action avec l'aide des modules de plus bas niveau.

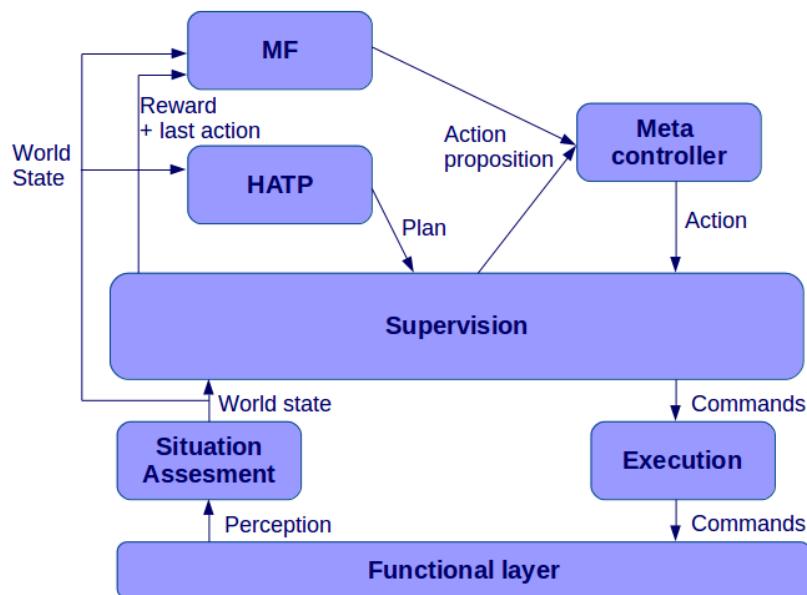


FIGURE 1.21 – Première architecture développée pour combiner les deux experts.

**Tâche :** Nous avons testé cette architecture sur une tâche simple en simulation illustrée Fig. 1.22. Dans cette tâche, l'Homme et le robot doivent enlever des objets d'une table et les mettre dans une boîte rose. Au début de l'interaction, deux objets sont accessibles uniquement par le robot et un autre uniquement par l'Homme. La boîte est accessible uniquement par le robot. Pour réaliser la tâche, l'Homme et le robot peuvent exécuter différentes actions (prendre un objet, ranger un objet, s'échanger un objet ou attendre).

Le comportement de l'Homme est simulé dans cette expérience. L'Homme est collaboratif : il exécute toutes les actions prévues pour lui dans HATP et participe à tous les échanges d'objets entrepris par le robot.

**Résultats :** Pour tester notre architecture, nous avons réalisé la tâche avec chaque expert seul dans un premier temps puis avec la combinaison des deux. La tâche a été

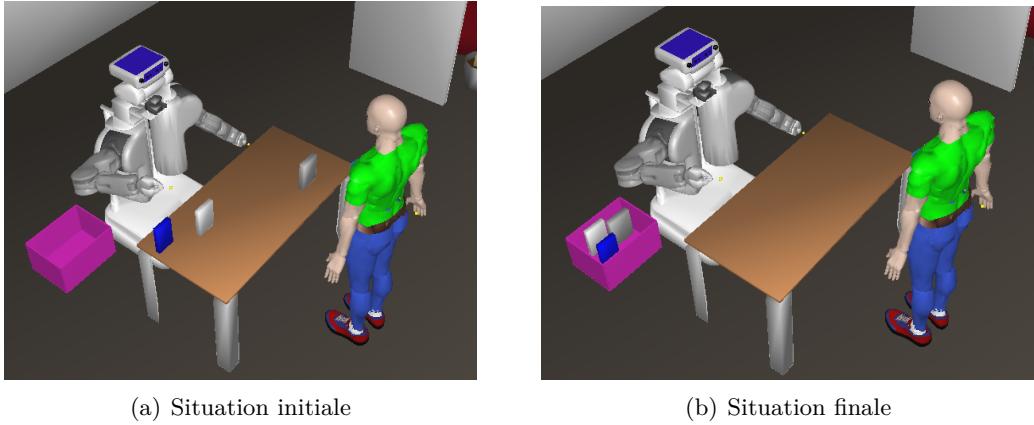


FIGURE 1.22 – Tâche utilisée pour tester la première architecture. L’Homme et le robot doivent enlever les objets de la table et les mettre dans la boîte rose.

réalisée en boucle dans un temps imparti. Le critère principal utilisé ici pour évaluer le système est le nombre de fois qu'il est capable de réaliser la tâche dans ce temps imparti. Les résultats pour 10 simulations de 30 minutes dans chaque condition peuvent être trouvés Fig. 1.23(a). On peut observer une faible performance du MF seul (algorithme d’apprentissage) due à son manque de connaissances initial. La combinaison des deux experts a de bien meilleures performances bien qu’elles restent en dessous de celles d’HATP seul. En effet, la tâche étant simple à résoudre pour HATP, son plan est toujours optimal. Finalement, nous pouvons voir Fig. 1.23(b) que la combinaison du MF et d’HATP permet au MF d’apprendre bien plus vite que quand il est seul.

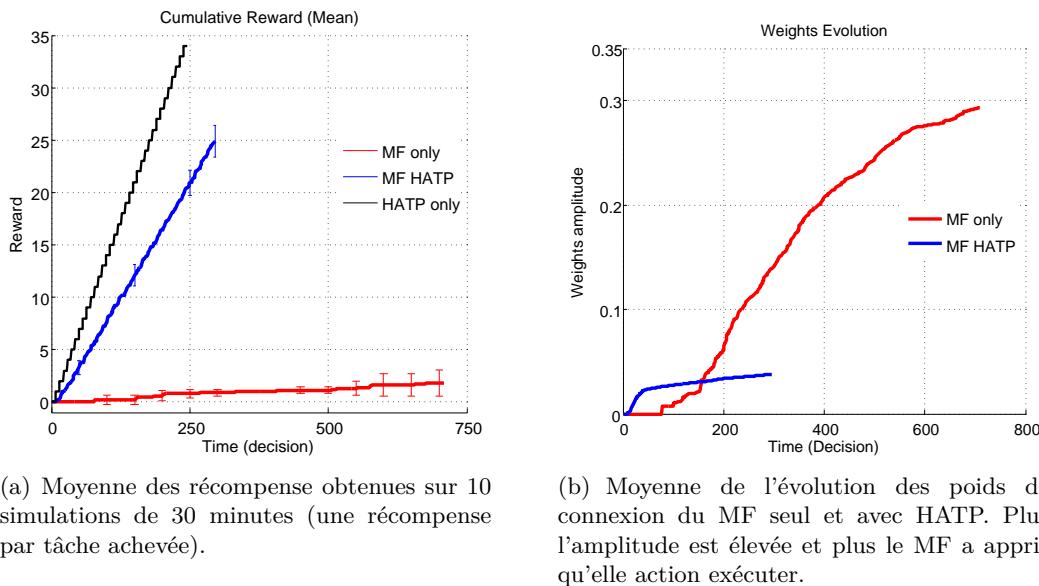


FIGURE 1.23 – Performances de l’architecture testée comparées aux experts seuls.

Les premiers résultats obtenus montrent que la combinaison d'HATP et du MF permet d'accélérer l'apprentissage du MF. Cependant, la tâche étant très simple, HATP n'a pas de difficulté quand il décide seul.

#### 1.4.2.4 Seconde architecture : les limitations

Dans un second temps, nous avons amélioré l'architecture et l'avons testée sur une tâche plus complexe afin de démontrer l'intérêt du système.

**Architecture :** Comme l'un des principaux avantages du MF par rapport à HATP est son temps de calcul, nous avons modifié l'architecture comme représenté Fig. 1.25. Dans cette version de l'architecture le meta-contrôleur est en amont des experts. Un expert ne sera activé uniquement que lorsque le meta-contrôleur choisira qu'il doit décider de la prochaine action.

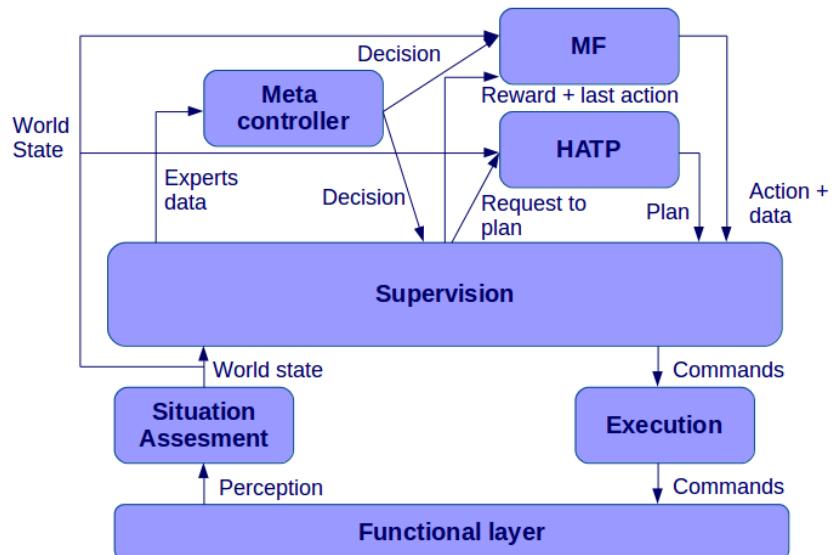


FIGURE 1.24 – Seconde architecture développée pour combiner les deux experts.

Nous avons également introduit dans cette nouvelle architecture un nouveau critère pour la prise de décision du meta-contrôleur (précédemment aléatoire). Ce critère est basé sur le coût de chaque expert (temps à trouver une solution) et son erreur de prédiction.

**Tâche :** Pour augmenter la complexité de la tâche, nous avons dans un premier temps augmenté sa combinatoire. Dans la nouvelle tâche il y a maintenant 6 objets qui doivent aller dans deux boîtes différentes en fonction de leur couleur. Ces objets sont initialement placés de manière aléatoire sur 7 emplacements possibles sur la table au début de la tâche comme Fig. 1.25. De nouvelles actions sont également possibles pour le robot, il peut maintenant replacer un objet sur un des emplacements ou naviguer à une autre position près de la table.

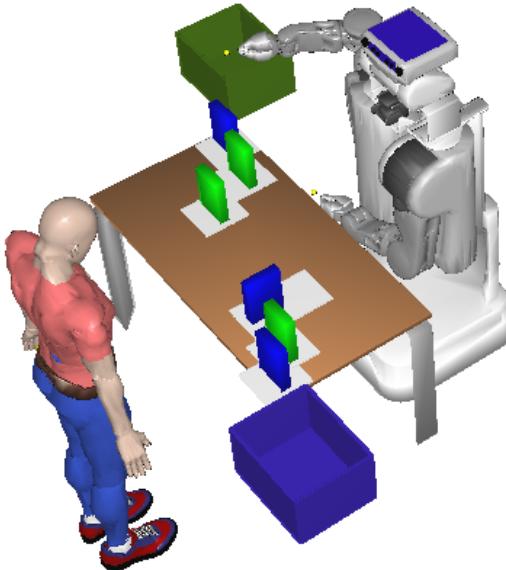


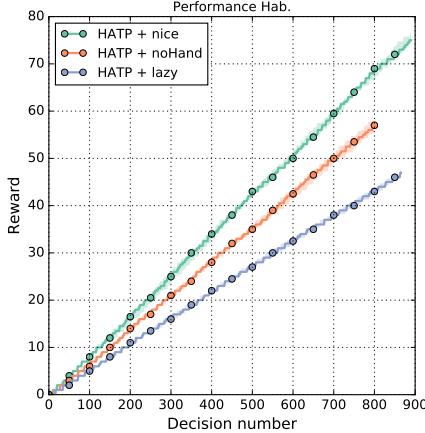
FIGURE 1.25 – Tâche utilisée pour tester la seconde architecture. L’Homme et le robot doivent enlever les objets de la table et les mettre dans les boîtes de même couleur.

Nous avons également ajouté dans la tâche des difficultés géométriques qui ne peuvent pas être gérées par la planification (certains objets supposés accessibles ne peuvent en fait pas être attrapés par le robot). Finalement, nous avons également implémenté différents comportements pour l’homme simulé (plus ou moins coopératifs).

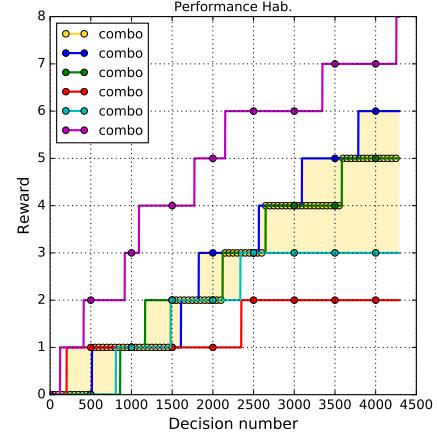
**Résultats :** Comme la tâche est plus complexe, nous avons légèrement augmenté le temps de simulation. Comme précédemment, nous avons testé le système avec chaque expert séparément puis avec la combinaison des deux. Logiquement, HATP présente de meilleurs résultats avec un Homme plus collaboratif et le MF présente de pauvres résultats seul. Cependant, nous n’avons pas réussi à avoir des résultats pour la combinaison des deux experts supérieurs à ceux d’HATP seul. Cela est dû au fait qu’avec une tâche plus complexe, l’effet d’accélération d’HATP sur l’apprentissage du MF n’est plus suffisant pour lui permettre d’apprendre une solution pour la tâche et donc lui permettre d’aider le système.

Afin d’obtenir un système plus performant, de possibles améliorations seraient de retravailler l’algorithme d’apprentissage afin de mieux l’adapter au contexte et lui permettre d’apprendre plus rapidement. Une autre amélioration possible serait de chercher un nouveau critère d’arbitrage pour le meta-contrôleur. Enfin, il serait intéressant de permettre à HATP d’obtenir un retour de ce qu’apprend le MF afin

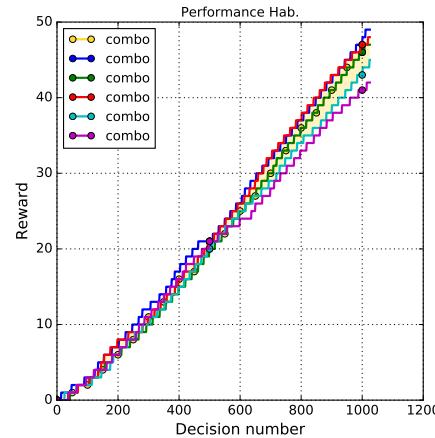
d'adapter en ligne ses modèles de planification.



(a) Moyenne des récompenses obtenues sur 10 simulations de 40 minutes pour HATP seul (une récompense par tâche achevée).



(b) Moyenne des récompenses obtenues sur 10 simulations de 40 minutes pour le MF seul (une récompense par tâche achevée).



(c) Moyenne des récompenses obtenues sur 10 simulations de 40 minutes pour la combinaison des deux experts (une récompense par tâche achevée).

FIGURE 1.26 – Moyenne des récompenses obtenues dans chaque condition.

## 1.5 Conclusion

Plusieurs contributions sont présentées dans ce manuscrit :

- Dans un premier temps, nous avons étudié les bases de l'action conjointe entre Hommes et comment ces principes s'appliquent à l'interaction Homme-robot afin de construire un superviseur pour la décision lors de l'action conjointe Homme-robot.
- Dans un second temps nous avons étudié comment améliorer la gestion des plans partagés par le robot. Nous avons d'abord étendu l'estimation des états mentaux de l'Homme par le robot au plan partagé, puis, nous avons amélioré les algorithmes de gestion du plan pour rendre le comportement du robot plus flexible. Enfin, nous avons évalué ces deux contributions en simulation et en conditions réelles grâce à une étude utilisateur.
- Enfin, nous avons présenté deux autres contributions à l'interaction Homme-Robot. La première concerne la gestion de la tête du robot lors d'une tâche collaborative. La seconde cherche à combiner deux méthodes de prise de décision par le robot : la planification et l'apprentissage.

# Bibliography

- [Alami 1998] Rachid Alami, Raja Chatila, Sara Fleury, Malik Ghallab and Félix Ingrand. *An architecture for autonomy*. The International Journal of Robotics Research, vol. 17, no. 4, pages 315–337, 1998. (Cited in page 5.)
- [Allen 2002] James Allen and George Ferguson. *Human-machine collaborative planning*. In Third International NASA Workshop on Planning and Scheduling for Space, 2002. (Cited in page 4.)
- [Argyle 1976] Michael Argyle and Mark Cook. *Gaze and mutual gaze*. 1976. (Cited in page 24.)
- [Baker 2014] Chris L Baker and Joshua B Tenenbaum. *Modeling human plan recognition using bayesian theory of mind*. Plan, activity, and intent recognition: Theory and practice, pages 177–204, 2014. (Cited in pages 4 and 10.)
- [Baron-Cohen 1985] Simon Baron-Cohen, Alan M Leslie and Uta Frith. *Does the autistic child have a “theory of mind”?* Cognition, vol. 21, no. 1, pages 37–46, 1985. (Cited in page 9.)
- [Baron-Cohen 1997] Simon Baron-Cohen. Mindblindness: An essay on autism and theory of mind. MIT press, 1997. (Cited in page 10.)
- [Bartneck 2009] Christoph Bartneck, Dana Kulić, Elizabeth Croft and Susana Zoghbi. *Measurement instruments for the anthropomorphism, animacy, likeability, perceived intelligence, and perceived safety of robots*. International journal of social robotics, vol. 1, no. 1, pages 71–81, 2009. (Cited in page 21.)
- [Becchio 2010] Cristina Becchio, Luisa Sartori and Umberto Castiello. *Toward you: The social side of actions*. Current Directions in Psychological Science, vol. 19, no. 3, pages 183–188, 2010. (Cited in page 24.)
- [Berlin 2006] Matt Berlin, Jesse Gray, Andrea Lockerd Thomaz and Cynthia Breazeal. *Perspective taking: An organizing principle for learning in human-robot interaction*. In AAAI, volume 2, pages 1444–1450, 2006. (Cited in page 10.)
- [Boucher 2010] Jean-David Boucher, Jocelyne Ventre-Dominey, Peter Ford Dominey, Sacha Fagel and Gerard Bailly. *Facilitative effects of communicative gaze and speech in human-robot cooperation*. In Proceedings of the 3rd international workshop on Affective interaction in natural environments, pages 71–74. ACM, 2010. (Cited in pages 4 and 24.)
- [Boucher 2012] Jean-David Boucher, Ugo Pattacini, Amelie Lelong, Gerard Bailly, Frederic Elisei, Sascha Fagel, Peter Ford Dominey and Jocelyne Ventre-Dominey. *I reach faster when I see you look: gaze effects in human-human and human-robot face-to-face cooperation*. Frontiers in neurorobotics, vol. 6, 2012. (Cited in page 24.)

- [Bratman 1989] Michael E Bratman. *Intention and personal policies*. Philosophical perspectives, vol. 3, pages 443–469, 1989. (Cited in page 2.)
- [Bratman 1993] Michael E Bratman. *Shared intention*. Ethics, vol. 104, no. 1, pages 97–113, 1993. (Cited in page 2.)
- [Breazeal 2005] Cynthia Breazeal, Cory D Kidd, Andrea Lockerd Thomaz, Guy Hoffman and Matt Berlin. *Effects of nonverbal communication on efficiency and robustness in human-robot teamwork*. In Intelligent Robots and Systems, 2005.(IROS 2005). 2005 IEEE/RSJ International Conference on, pages 708–713. IEEE, 2005. (Cited in page 4.)
- [Breazeal 2006] Cynthia Breazeal, Matt Berlin, Andrew Brooks, Jesse Gray and Andrea L Thomaz. *Using perspective taking to learn from ambiguous demonstrations*. Robotics and autonomous systems, vol. 54, no. 5, pages 385–393, 2006. (Cited in pages 4 and 10.)
- [Breazeal 2009] Cynthia Breazeal, Jesse Gray and Matt Berlin. *An embodied cognition approach to mindreading skills for socially intelligent robots*. The International Journal of Robotics Research, vol. 28, no. 5, pages 656–680, 2009. (Cited in page 4.)
- [Broekens 2013] Joost Broekens and Willem-Paul Brinkman. *AffectButton: A method for reliable and valid affective self-report*. International Journal of Human-Computer Studies, vol. 71, no. 6, pages 641–667, 2013. (Cited in page 21.)
- [Bui 2003] Hung Hai Bui. *A general model for online probabilistic plan recognition*. In IJCAI, volume 3, pages 1309–1315, 2003. (Cited in page 4.)
- [Cakmak 2011] Maya Cakmak, Siddhartha S Srinivasa, Min Kyung Lee, Jodi Forlizzi and Sara Kiesler. *Human preferences for robot-human hand-over configurations*. In Intelligent Robots and Systems (IROS), 2011 IEEE/RSJ International Conference on, pages 1986–1993. IEEE, 2011. (Cited in page 4.)
- [Castiello 2003] Umberto Castiello. *Understanding other people’s actions: intention and attention*. Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, vol. 29, no. 2, page 416, 2003. (Cited in page 24.)
- [Cirillo 2010] Marcello Cirillo, Lars Karlsson and Alessandro Saffiotti. *Human-aware task planning: an application to mobile robots*. IST, 2010. (Cited in page 4.)
- [Clark 1996] Herbert H Clark. *Using language*. 1996. Cambridge University Press: Cambridge, vol. 952, pages 274–296, 1996. (Cited in page 4.)
- [Clodic 2009] Aurélie Clodic, Hung Cao, Samir Alili, Vincent Montreuil, Rachid Alami and Raja Chatila. *Shary: a supervision system adapted to human-robot interaction*. In Experimental Robotics, pages 229–238. Springer, 2009. (Cited in page 4.)
- [Clodic 2014] Aurélie Clodic, Rachid Alami and Raja Chatila. *Key Elements for Human-Robot Joint Action*. Frontiers in AI and Applications, 2014. (Cited in page 15.)

- [Cohen 1991] Philip R Cohen and Hector J Levesque. *Teamwork*. Nous, vol. 25, no. 4, pages 487–512, 1991. (Cited in page 10.)
- [Coradeschi 2003] Silvia Coradeschi and Alessandro Saffiotti. *An introduction to the anchoring problem*. Robotics and Autonomous Systems, vol. 43, no. 2, pages 85–96, 2003. (Cited in page 4.)
- [Dautenhahn 2007] Kerstin Dautenhahn. *Socially intelligent robots: dimensions of human–robot interaction*. Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences, vol. 362, no. 1480, pages 679–704, 2007. (Cited in page 1.)
- [Davis 1989] Fred D Davis. *Perceived usefulness, perceived ease of use, and user acceptance of information technology*. MIS quarterly, pages 319–340, 1989. (Cited in page 21.)
- [Dehais 2011] Frédéric Dehais, Emrah Akin Sisbot, Rachid Alami and Mickaël Causse. *Physiological and subjective evaluation of a human–robot object hand-over task*. Applied ergonomics, vol. 42, no. 6, pages 785–791, 2011. (Cited in page 4.)
- [DePaulo 1992] Bella M DePaulo. *Nonverbal behavior and self-presentation*. Psychological bulletin, vol. 111, no. 2, page 203, 1992. (Cited in page 24.)
- [Devin 2016] Sandra Devin, Grégoire Milliez, Michelangelo Fiore, Aurélie Clodic and Rachid Alami. *Some essential skills and their combination in an architecture for a cognitive and interactive robot*. arXiv preprint arXiv:1603.00583, 2016. (Cited in page 6.)
- [Dickinson 1985] Anthony Dickinson. *Actions and habits: the development of behavioural autonomy*. Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences, vol. 308, no. 1135, pages 67–78, 1985. (Cited in page 29.)
- [Ekman 1969] Paul Ekman and Wallace V Friesen. *The repertoire of nonverbal behavior: Categories, origins, usage, and coding*. semiotica, vol. 1, no. 1, pages 49–98, 1969. (Cited in page 24.)
- [Ferreira 2015] Emmanuel Ferreira, Grégoire Milliez, Fabrice Lefèvre and Rachid Alami. *Users’ belief awareness in reinforcement learning-based situated human–robot dialogue management*. In Natural Language Dialog Systems and Intelligent Assistants, pages 73–86. Springer, 2015. (Cited in page 4.)
- [Fiore 2014] Michelangelo Fiore, Aurélie Clodic and Rachid Alami. *On planning and task achievement modalities for human–robot collaboration*. In ISER, 2014. (Cited in page 14.)
- [Flavell 1977] John H Flavell. *The development of knowledge about visual perception*. In Nebraska symposium on motivation. University of Nebraska Press, 1977. (Cited in page 9.)
- [Flavell 1992] John H Flavell, H Beilin and P Pufall. *Perspectives on perspective-taking*. Piaget’s theory: Prospects and possibilities, pages 107–139, 1992. (Cited in page 9.)

- [Furlanetto 2013] Tiziano Furlanetto, Andrea Cavallo, Valeria Manera, Barbara Tversky and Cristina Becchio. *Through your eyes: incongruence of gaze and action increases spontaneous perspective taking*. Frontiers in human neuroscience, vol. 7, 2013. (Cited in page 24.)
- [Ghallab 1994] Malik Ghallab and Hervé Laruelle. *Representation and Control in IxTeT, a Temporal Planner*. In AIPS, volume 1994, pages 61–67, 1994. (Cited in page 4.)
- [Gibson 1977] James J Gibson. *Perceiving, acting, and knowing: Toward an ecological psychology*. The Theory of Affordances, pages 67–82, 1977. (Cited in page 3.)
- [Grosz 1988] Barbara J Grosz and Candace L Sidner. *Plans for discourse*. Technical Report, DTIC Document, 1988. (Cited in page 2.)
- [Häring 2012] Markus Häring, Jessica Eichberg and Elisabeth André. *Studies on grounding with gaze and pointing gestures in human-robot-interaction*. Social Robotics, pages 378–387, 2012. (Cited in page 24.)
- [Hart 2014] Justin W Hart, Brian Gleeson, Matthew Pan, AJung Moon, Karon MacLean and Elizabeth Croft. *Gesture, gaze, touch, and hesitation: Timing cues for collaborative work*. In HRI Workshop on Timing in Human-Robot Interaction, Bielefeld, Germany, 2014. (Cited in page 4.)
- [Hassenzahl 2003] Marc Hassenzahl. *The thing and I: understanding the relationship between user and product*. In Funology, pages 31–42. Springer, 2003. (Cited in page 21.)
- [Hiatt 2010] Laura M Hiatt and J Gregory Trafton. *A cognitive model of theory of mind*. In Proceedings of the 10th International Conference on Cognitive Modeling, pages 91–96. Citeseer, 2010. (Cited in page 10.)
- [Imai 2002] Michita Imai, Takayuki Kanda, Testuo Ono, Hiroshi Ishiguro and Kenji Mase. *Robot mediated round table: Analysis of the effect of robot’s gaze*. In Robot and Human Interactive Communication, 2002. Proceedings. 11th IEEE International Workshop on, pages 411–416. IEEE, 2002. (Cited in page 24.)
- [Ingrand 2014] Félix Ingrand and Malik Ghallab. *Deliberation for autonomous robots: A survey*. Artificial Intelligence, 2014. (Cited in page 29.)
- [Johnson 2005] Matthew Johnson and Yiannis Demiris. *Perceptual perspective taking and action recognition*. International Journal of Advanced Robotic Systems, vol. 2, no. 4, page 32, 2005. (Cited in page 10.)
- [Karpas 2015] Erez Karpas, Steven James Levine, Peng Yu and Brian C Williams. *Robust Execution of Plans for Human-Robot Teams*. In ICAPS, pages 342–346, 2015. (Cited in page 4.)
- [Kendon 1967] Adam Kendon. *Some functions of gaze-direction in social interaction*. Acta psychologica, vol. 26, pages 22–63, 1967. (Cited in page 24.)

- [Knoblich 2011] Günther Knoblich, Stephen Butterfill and Natalie Sebanz. *3 Psychological research on joint action: theory and data*. Psychology of Learning and Motivation-Advances in Research and Theory, vol. 54, page 59, 2011. (Cited in page 3.)
- [Kober 2011] Jens Kober and Jan Peters. *Learning elementary movements jointly with a higher level task*. In Intelligent Robots and Systems (IROS), 2011 IEEE/RSJ International Conference on, pages 338–343. IEEE, 2011. (Cited in page 29.)
- [Kruse 2013] Thibault Kruse, Amit Kumar Pandey, Rachid Alami and Alexandra Kirsch. *Human-aware robot navigation: A survey*. Robotics and Autonomous Systems, vol. 61, no. 12, pages 1726–1743, 2013. (Cited in page 5.)
- [LaBarre 1947] Weston LaBarre. *The cultural basis of emotions and gestures*. Journal of personality, vol. 16, no. 1, pages 49–68, 1947. (Cited in page 24.)
- [Lallée 2013] Stéphane Lallée, Katharina Hamann, Jasmin Steinwender, Felix Warneken, Uriel Martienz, Hector Barron-Gonzales, Ugo Pattacini, Ilaria Gori, Marc Petit, Giorgio Metta et al. *Cooperative human robot interaction systems: IV. Communication of shared plans with Naïve humans using gaze and speech*. In IROS, IEEE/RSJ, 2013. (Cited in page 24.)
- [Lallemand 2015] Carine Lallemand, Vincent Koenig, Guillaume Gronier and Romain Martin. *Création et validation d'une version française du questionnaire AttrakDiff pour l'évaluation de l'expérience utilisateur des systèmes interactifs*. Revue Européenne de Psychologie Appliquée/European Review of Applied Psychology, vol. 65, no. 5, pages 239–252, 2015. (Cited in page 21.)
- [Lallement 2014] Raphaël Lallement, Lavindra de Silva and Rachid Alami. *HATP: An HTN Planner for Robotics*. CoRR, 2014. (Cited in pages 4, 13, and 29.)
- [Lemai 2004] Solange Lemai and Félix Ingrand. *Interleaving temporal planning and execution in robotics domains*. In AAAI, volume 4, pages 617–622, 2004. (Cited in page 4.)
- [Lemaignan 2012] Séverin Lemaignan, Raquel Ros, E Akin Sisbot, Rachid Alami and Michael Beetz. *Grounding the interaction: Anchoring situated discourse in everyday human-robot interaction*. International Journal of Social Robotics, vol. 4, no. 2, pages 181–199, 2012. (Cited in page 4.)
- [Lesaint 2014] Florian Lesaint, Olivier Sigaud, Shelly B Flagel, Terry E Robinson and Mehdi Khamassi. *Modelling individual differences in the form of pavlovian conditioned approach responses: a dual learning systems approach with factored representations*. PLoS Comput Biol, vol. 10, no. 2, page e1003466, 2014. (Cited in page 29.)
- [Leslie 1984] Alan M Leslie. *Spatiotemporal continuity and the perception of causality in infants*. Perception, vol. 13, no. 3, pages 287–305, 1984. (Cited in page 10.)

- [Lucignano 2013] Lorenzo Lucignano, Francesco Cutugno, Silvia Rossi and Alberto Finzi. *A dialogue system for multimodal human-robot interaction*. In Proceedings of the 15th ACM on International conference on multimodal interaction, pages 197–204. ACM, 2013. (Cited in page 4.)
- [Mahlke 2008] Sascha Mahlke. *User experience of interaction with technical systems*. 2008. (Cited in page 21.)
- [Mainprice 2012] Jim Mainprice, Mamoun Gharbi, Thierry Siméon and Rachid Alami. *Sharing effort in planning human-robot handover tasks*. In RO-MAN, 2012 IEEE, pages 764–770. IEEE, 2012. (Cited in page 4.)
- [Martins 2010] Murilo Fernandes Martins and Yiannis Demiris. *Learning multi-robot joint action plans from simultaneous task execution demonstrations*. In Proceedings of the 9th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems: volume 1-Volume 1, pages 931–938. International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems, 2010. (Cited in page 29.)
- [Mavridis 2005] Nikolaos Mavridis and Deb Roy. *Grounded situation models for robots: Bridging language, perception, and action*. In AAAI-05 workshop on modular construction of human-like intelligence, 2005. (Cited in page 4.)
- [Mehrabian 1969] Albert Mehrabian. *Significance of posture and position in the communication of attitude and status relationships*. Psychological Bulletin, vol. 71, no. 5, page 359, 1969. (Cited in page 24.)
- [Milliez 2014] Grégoire Milliez, Matthieu Warnier, Aurélie Clodic and Rachid Alami. *A framework for endowing an interactive robot with reasoning capabilities about perspective-taking and belief management*. In Robot and Human Interactive Communication, 2014 RO-MAN: The 23rd IEEE International Symposium on, pages 1103–1109. IEEE, 2014. (Cited in pages 4 and 10.)
- [Milliez 2016] Grégoire Milliez, Raphaël Lallement, Michelangelo Fiore and Rachid Alami. *Using human knowledge awareness to adapt collaborative plan generation, explanation and monitoring*. In HRI ACM/IEEE, 2016. (Cited in page 4.)
- [Mohseni-Kabir 2015] A. Mohseni-Kabir, C. Rich, S. Chernova, C. L. Sidner and D. Miller. *Interactive Hierarchical Task Learning from a Single Demonstration*. In HRI, ACM/IEEE, 2015. (Cited in page 4.)
- [Mutlu 2009a] Bilge Mutlu. *Designing gaze behavior for humanlike robots*. PhD thesis, Carnegie Mellon University, 2009. (Cited in page 24.)
- [Mutlu 2009b] Bilge Mutlu, Toshiyuki Shiwa, Takayuki Kanda, Hiroshi Ishiguro and Norihiro Hagita. *Footing in human-robot conversations: how robots might shape participant roles using gaze cues*. In Proceedings of the 4th ACM/IEEE international conference on Human robot interaction, pages 61–68. ACM, 2009. (Cited in pages 4 and 24.)

- [Nagai 2015] Takayuki Nagai, Kasumi Abe, Tomoaki Nakamura, Natsuki Oka and Takashi Omori. *Probabilistic modeling of mental models of others*. In Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN), 2015 24th IEEE International Symposium on, pages 89–94. IEEE, 2015. (Cited in pages 4 and 10.)
- [Obhi 2011] Sukhvinder S Obhi and Natalie Sebanz. *Moving together: toward understanding the mechanisms of joint action*, 2011. (Cited in page 2.)
- [Pacherie 2011] Elisabeth Pacherie. *The Phenomenology of Joint Action: Self-Agency versus Joint Agency*. Joint attention: New developments in psychology, philosophy of mind, and social neuroscience, page 343, 2011. (Cited in pages 2 and 5.)
- [Petit 2013] Marc Petit, Stéphane Lallée, J-D Boucher, Grégoire Pointeau, Pierrick Cheminade, Dimitri Ognibene, Eris Chinellato, Ugo Pattacini, Ilaria Gori, Uriel Martinez-Hernandez et al. *The coordinating role of language in real-time multimodal learning of cooperative tasks*. Autonomous Mental Development, IEEE, 2013. (Cited in page 4.)
- [Pezzulo 2013] Giovanni Pezzulo, Francesco Rigoli and Fabian Chersi. *The mixed instrumental controller: using value of information to combine habitual choice and mental simulation*. Frontiers in psychology, vol. 4, page 92, 2013. (Cited in page 29.)
- [Pierno 2006] Andrea C Pierno, Cristina Becchio, Matthew B Wall, Andrew T Smith, Luca Turella and Umberto Castiello. *When gaze turns into grasp*. Journal of Cognitive Neuroscience, vol. 18, no. 12, pages 2130–2137, 2006. (Cited in page 24.)
- [Pointeau 2014] Grégoire Pointeau, Maxime Petit and Peter Ford Dominey. *Successive developmental levels of autobiographical memory for learning through social interaction*. IEEE Transactions on Autonomous Mental Development, vol. 6, no. 3, pages 200–212, 2014. (Cited in page 4.)
- [Premack 1978] David Premack and Guy Woodruff. *Does the chimpanzee have a theory of mind?* Behavioral and brain sciences, vol. 1, no. 04, pages 515–526, 1978. (Cited in page 9.)
- [Ramirez 2009] Miquel Ramirez and Hector Geffner. *Plan recognition as planning*. In Proceedings of the 21st international joint conference on Artificial intelligence. Morgan Kaufmann Publishers Inc, pages 1778–1783, 2009. (Cited in page 4.)
- [Renaudo 2014] Erwan Renaudo, Benoît Girard, Raja Chatila and Mehdi Khamassi. *Design of a control architecture for habit learning in robots*. In Conference on Biomimetic and Biohybrid Systems, pages 249–260. Springer, 2014. (Cited in page 30.)
- [Richardson 2007] Michael J Richardson, Kerry L Marsh, Robert W Isenhower, Justin RL Goodman and Richard C Schmidt. *Rocking together: Dynamics of*

- intentional and unintentional interpersonal coordination.* Human movement science, vol. 26, no. 6, pages 867–891, 2007. (Cited in page 3.)
- [Rizzolatti 2004] Giacomo Rizzolatti and Laila Craighero. *The mirror-neuron system.* Annu. Rev. Neurosci., vol. 27, pages 169–192, 2004. (Cited in page 3.)
- [Roberts 2016] Mark Roberts, Ron Alford, Vikas Shivashankar, Michael Leece, Shubham Gupta and David W Aha. *Goal reasoning, planning, and acting with actorsim, the actor simulator.* In ICAPS Workshop on Planning and Robotics (PlanRob), 2016. (Cited in page 4.)
- [Ros 2010] Raquel Ros, Séverin Lemaignan, E Akin Sisbot, Rachid Alami, Jasmin Steinwender, Katharina Hamann and Felix Warneken. *Which one? grounding the referent based on efficient human-robot interaction.* In RO-MAN, 2010 IEEE, pages 570–575. IEEE, 2010. (Cited in page 4.)
- [Roy 2000] Nicholas Roy, Joelle Pineau and Sebastian Thrun. *Spoken dialogue management using probabilistic reasoning.* In Proceedings of the 38th Annual Meeting on Association for Computational Linguistics, pages 93–100. Association for Computational Linguistics, 2000. (Cited in page 4.)
- [Salam 2015] Hanan Salam and Mohamed Chetouani. *A multi-level context-based modeling of engagement in human-robot interaction.* In Automatic Face and Gesture Recognition (FG), 2015 11th IEEE International Conference and Workshops on, volume 3, pages 1–6. IEEE, 2015. (Cited in page 4.)
- [Sanghvi 2011] Jyotirmay Sanghvi, Ginevra Castellano, Iolanda Leite, André Pereira, Peter W McOwan and Ana Paiva. *Automatic analysis of affective postures and body motion to detect engagement with a game companion.* In Human-Robot Interaction (HRI), 2011 6th ACM/IEEE International Conference on, pages 305–311. IEEE, 2011. (Cited in page 4.)
- [Scassellati 2002] Brian Scassellati. *Theory of mind for a humanoid robot.* Autonomous Robots, vol. 12, no. 1, pages 13–24, 2002. (Cited in page 10.)
- [Sebanz 2006] Natalie Sebanz, Harold Bekkering and Günther Knoblich. *Joint action: bodies and minds moving together.* Trends in cognitive sciences, vol. 10, no. 2, pages 70–76, 2006. (Cited in page 2.)
- [Shah 2011] Julie Shah, James Wiken, Brian Williams and Cynthia Breazeal. *Improved human-robot team performance using chaski, a human-inspired plan execution system.* In Proceedings of the 6th international conference on Human-robot interaction, pages 29–36. ACM, 2011. (Cited in page 4.)
- [Singla 2011] Parag Singla and Raymond J Mooney. *Abductive Markov Logic for Plan Recognition.* In AAAI, pages 1069–1075, 2011. (Cited in page 4.)
- [Sisbot 2012] Emrah Akin Sisbot and Rachid Alami. *A human-aware manipulation planner.* IEEE Transactions on Robotics, vol. 28, no. 5, pages 1045–1057, 2012. (Cited in page 5.)
- [Skantze 2014] Gabriel Skantze, Anna Hjalmarsson and Catharine Oertel. *Turn-taking, feedback and joint attention in situated human–robot interaction.* Speech Communication, vol. 65, pages 50–66, 2014. (Cited in page 24.)

- [Sorce 2015] Marwin Sorce, Grégoire Pointeau, Maxime Petit, Anne-Laure Mealier, Guillaume Gibert and Peter Ford Dominey. *Proof of concept for a user-centered system for sharing cooperative plan knowledge over extended periods and crew changes in space-flight operations*. In RO-MAN, IEEE, 2015. (Cited in page 4.)
- [Stulp 2013] Freek Stulp and Olivier Sigaud. *Robot skill learning: From reinforcement learning to evolution strategies*. Paladyn, Journal of Behavioral Robotics, vol. 4, no. 1, pages 49–61, 2013. (Cited in page 29.)
- [Tomasello 2005] Michael Tomasello, Malinda Carpenter, Josep Call, Tanya Behne and Henrike Moll. *Understanding and sharing intentions: The origins of cultural cognition*. Behavioral and brain sciences, vol. 28, no. 05, pages 675–691, 2005. (Cited in page 2.)
- [Tversky 1999] Barbara Tversky, Paul Lee and Scott Mainwaring. *Why do speakers mix perspectives?* Spatial cognition and computation, vol. 1, no. 4, pages 399–412, 1999. (Cited in page 9.)
- [Vesper 2010] Cordula Vesper, Stephen Butterfill, Günther Knoblich and Natalie Sebanz. *A minimal architecture for joint action*. Neural Networks, vol. 23, no. 8, pages 998–1003, 2010. (Cited in pages 3 and 24.)
- [Viejo 2015] Guillaume Viejo, Mehdi Khamassi, Andrea Brovelli and Benoît Giard. *Modeling choice and reaction time during arbitrary visuomotor learning through the coordination of adaptive working memory and reinforcement learning*. Frontiers in behavioral neuroscience, vol. 9, 2015. (Cited in page 29.)
- [Walters 2007] Michael L Walters, Kerstin Dautenhahn, Sarah N Woods and Kheng Lee Koay. *Robotic etiquette: results from user studies involving a fetch and carry task*. In Proceedings of the ACM/IEEE international conference on Human-robot interaction, pages 317–324. ACM, 2007. (Cited in page 5.)
- [Warnier 2012] Mathieu Warnier, Julien Guitton, Séverin Lemaignan and Rachid Alami. *When the robot puts itself in your shoes. managing and exploiting human and robot beliefs*. In RO-MAN, 2012 IEEE, pages 948–954. IEEE, 2012. (Cited in page 10.)
- [Weistroffer 2014] Vincent Weistroffer. *Étude des conditions d'acceptabilité de la collaboration homme-robot en utilisant la réalité virtuelle*. PhD thesis, Paris, ENMP, 2014. (Cited in page 21.)