La pertinence dans le choix et l'interprétation d'actions – Rapport préliminaire

Jérôme Lang
lang@irit.fr

Institut de Recherche en Informatique de Toulouse – CNRS (UMR 5505)
118 Route de Narbonne, F-31062 Toulouse cedex 4

Abstract:
Que peut-on inférer concernant les croyances, les buts et les intentions d'un agent, simplement en l'observant ? On propose ici une approche pour répondre à cette question, qui est fondée sur l'hypothèse intuitive qu'un agent choisit toujours des actions pertinentes par rapport au contexte de décision dans lequel il se situe. On va donc s'attacher à donner plusieurs définitions de la pertinence pour un contexte de décision, puis montrer comment utiliser cette notion pour raisonner sur les croyances, buts et intentions de l'agent observé.

1 Introduction

Considérons deux agents rationnels dont l'un, appelé *observateur*, observe le comportement de l'autre, appelé *acteur*, sans interagir avec ce dernier[1]. De nombreux travaux ont montré qu'un agent rationnel pouvait raisonnablement être défini par ses croyances, ses désirs et ses intentions à chaque instant[10] (et nous ne chercherons pas à entrer dans une discussion de ce point de vue ; il nous semble suffisamment raisonnable pour ce qui va suivre – il faut toutefois noter que la notion d'intention que nous allons utiliser par la suite diffère des définitions habituelles dans la littérature sur les agents rationnels).

L'observateur peut inférer du comportement de l'acteur de nouvelles croyances sur les croyances, les buts et les intentions de l'acteur. Quel est le processus qui permet d'inférer de telles croyances ? Donnons d'abord quelques exemples avant d'avancer des explications.

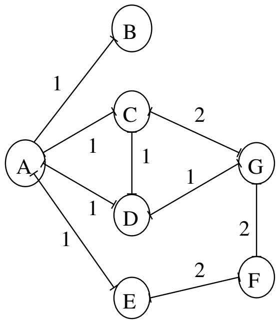
Example 1 (Le compte est bon) *Étant donné une liste L d'entiers, il s'agit de trouver une suite d'applications d'opérations arithmétiques élémentaires ($+$, $-$, $\times$ et division exacte) permettant d'obtenir un entier "but" N_G ; chaque application d'une opération élémentaire $*$ sur deux éléments N, N' de L a comme effet l'ajout du résultat $N * N'$ à L et le retrait de N et N' de L. Supposons en outre que plus le plan est court, plus la récompense de l'acteur est forte. Par exemple, soit $L = \langle 25, 10, 7, 5, 3, 1\rangle$ et $N_G = 78$. Il existe plusieurs plans permettant d'atteindre le but, comme $\pi_1 = appliquer(+, 25, 1); appliquer(\times, 26, 3)$, qu'on notera plus simplement $25+1 = 26; 26 \times 3 = 78$, ou encore $\pi_2 = 10 \times 7 = 70; 70 + 5 = 75; 75 + 3 = 78$. Le premier plan, qui est de longueur 2, est meilleur que le second, qui est de longueur 3. Supposons maintenant qu'on observe l'acteur effectuer l'action 10-7. Quelle est la prochaine action que l'aacteur a vraisemblablement l'intention d'effectuer ? On voit qu'il existe encore plusieurs plans possibles à partir de la liste $\langle 25, 5, 3, 3, 1\rangle$ obtenue après cette première action ; en voici deux : $\pi_3' : 25 + 1 = 26; 26 \times 3 = 78$ et $\pi_4' : 25 \times 3 = 75; 75+3 = 78$. Bien que ces deux plans soient de même longueur, ils ne peuvent toutefois pas être logés à la même enseigne, et le lecteur-observateur a probablement envie de parier, après réflexion, que la prochaine action qui sera entreprise par l'acteur sera $25 * 3$ plutôt que $25 + 1$, même si le plan π_1 est toujours applicable : en effet, π_1 n'utilise qu'une seule fois "3" et n'a donc pas besoin de l'action $10 - 7$ puisqu'il existe déjà un "3" disponible etl'action 10-7 ne serait donc pas pertinente.*

On voit sur cet exemple que l'inférence qui nous fait parier sur une prochaine action plausible est non-monotone, puisqu'initialement on considère que la prochaine action la plus plausible est 25+1, et que le fait observer l'acteur effectuer l'action 10-7 nous fait changer d'avis (alors que 25+1 permet toujours d'atteindre le but de manière optimale).

Example 2 *Considérons le graphe orienté valué suivant.*

1. *Supposons que l'observateur connaisse parfaitement le but de l'acteur (aller en*

[1] Nous supposons en outre, pour ne pas avoir à considérer d'interactions stratégiques, que l'agent acteur est indifférent à l'agent observateur – c'est-à-dire que son comportement n'est pas influencé par le fait qu'il est observé. On peut supposer, pour rendre ces questions non pertinentes, que l'acteur *ne sait pas* qu'il est observé.

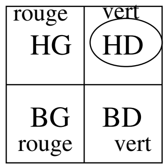


G, et rien d'autre), et qu'il sache aussi que l'acteur connait toujours sa position et cherche à atteindre son but tout en minimisant le coût de son trajet. L'observateur qui voit l'acteur en E et ignore le passé du processus s'attend probablement à voir l'acteur aller en A ; par contre, l'observateur qui voit l'acteur en A se déplacer en E s'attend probablement à le voir aller en F, bien que le chemin optimal de E à G ne passe pas par F : si l'acteur a fait le choix d'aller en F, c'est que ses capacités de raisonnement ont fait qu'il n'a pas "vu" qu'il existait des chemins plus courts – certes, il peut s'en rendre compte en cours de route, mais il est raisonnable de penser qu'il va s'en tenir à son plan initial ; or, il est plus plausible que celui-ci soit $A-E-F-G$, malgré son fort coût, que $A-E-A-B-G$, qui est de coût plus faible mais dont la sous-optimalité est bien plus évidente[2].

2. *Supposons maintenant que l'observateur ne connaisse plus le but de l'acteur (il sait cependant qu'il souhaite se rendre en un lieu unique), le reste étant inchangé. Il sait seulement que le but de l'acteur est "statique", c'est-à-dire que ce dernier souhaite aller dans une ville parmi un ensemble de villes-buts, et rien d'autre après que ce but sera atteint. L'observateur voit l'acteur se déplacer de A en E : qu'apprend-il sur son but ? Très probablement, que ce dernier est soit d'aller en E, soit d'aller en F, soit plus généralement d'aller dans n'importe lequel des états d'un ensemble d'états qui contient E ou F, qui ne contient pas A (sinon l'acteur ne se serait pas déplacé en E) et qui, s'il ne contient pas E, ne contient pas non plus B, C ni D.*

Example 3 *Le problème du voyageur de commerce canadien : on considère le même graphe que pour l'exemple précédent, mais cette fois les arcs peuvent être devenus impraticables, et seul l'acteur présent en l'une des deux extrémités d'un arc observe s'il l'arc peut être emprunté ou non. L'observateur ne connait pas la nature (praticable ou non) des arcs et n'observe le monde qu'à travers le comportement de l'acteur ; mais il connait son but (aller en G). Il voit ce dernier aller de A en D, puis en C ; que peut-il raisonnablement inférer sur l'état du monde, via les croyances de l'acteur ? (très vraisemblablement que $D \leftrightarrow G$ est bloqué). Dans un autre contexte, l'acteur va de A en C, puis en D ; cette fois, très vraisemblablement, $C \leftrightarrow G$ est bloqué, et, mais avec tout de même un léger doute, $A \leftrightarrow D$ aussi (à moins que l'acteur eût initialement une croyance subjective assez forte de l'état bloqué de DG qui l'ait dissadué d'aller en D – d'où le léger doute). Dans un troisième contexte, l'acteur va en D puis revient en A : cette fois, vraisemblablement, $D \leftrightarrow G$ et $C \leftrightarrow D$ sont bloqués (ou alors, si $C \leftrightarrow D$ n'est pas bloqué, l'acteur a une croyance forte en l'état bloqué de CG), et on peut raisonnablement supposer que l'acteur s'apprête à aller en C (ou, si cela n'est pas possible, en E).*
Supposons maintenant que l'observateur ne connait pas non plus le but de l'acteur. Il voit ce dernier aller en D puis en C : il peut raisonnablement inférer que l'une de ces situations est vraie : (a) l'acteur souhaite aller en G et $D \leftrightarrow G$ est bloqué ; (b) l'acteur souhaite aller en C et $A \leftrightarrow C$ est bloqué.

Example 4 *L'acteur se déplace dans un ensemble de 4 cases d'une surface carrée, appelées HG (en haut à gauche), BG, HD et BD. Les cases HG et BD sont rouges, les cases BG et HD sont vertes. Les actions que l'acteur peut entre-*



prendre sont de deux types : les actions physiques de déplacement $\boxed{\uparrow}$, $\boxed{\downarrow}$, $\boxed{\leftarrow}$, $\boxed{\rightarrow}$(aller en haut, en bas, à gauche, à droite) et l'action épistémique `regarder` *qui informe l'acteur de la couleur de la case sur laquelle il se trouve. Lorsque l'une des actions de déplacement est inexécutable (par exemple $\boxed{\uparrow}$ lorsqu'on est en HG), elle n'a aucun effet. On suppose enfin que*

[2] Attention ! Justifier le passage par F par "après tout, l'acteur avait peut-être aussi comme but d'aller en F ou n'avait pas envie de passer en B" n'est pas acceptable ici, pusiqu'on a supposé que l'observateur connaissait parfaitement les buts de l'acteur.

le but de l'acteur (parfaitement connu de l'utilisateur) est d'aller en HD à moindre côut, sachant que les actions de déplacement, qu'elles aient ou non un effet, coûtent plus cher que l'action `regarder` .

- *on voit l'acteur aller à droite, puis regarder ; quel est son état de croyance initial ? après quelques instants de réflexion, on arrive à la conclusion plausible que cet état de croyance initial est l'un des cinq suivants : {HG,BG}, {HD,BG}, {HG,HD,BG}, {HG,BG,BD}, {HG,HD,BG,BD}, et que son état de croyance actuel est, dans tous les cas, {HD,BD}.*
- *cette fois, l'acteur commence par exécuter l'action* `regarder` *. Son état de croyance initial est vraisemblablement l'un des trois suivants : {HG,BG}, {HD,BD}, { BG, BD}, {HG,HD,BD}. Dans le premier cas, l'action suivante sera probablement* $\boxed{\rightarrow}$ *si le feedback de l'action* `regarder` *est* `rouge`, $\boxed{\rightarrow}$ *ou* $\boxed{\uparrow}$ *si c'est* `vert` *; dans le second cas, ce sera probablement* λ *si* `rouge`, $\boxed{\uparrow}$ *si* `vert` *; dans le troisième cas,* $\boxed{\uparrow}$ *si* `rouge`, $\boxed{\rightarrow}$ *ou* $\boxed{\uparrow}$ *si* `vert` *; dans le quatrième cas,* λ *si* `vert`, $\boxed{\uparrow}$ *ou* $\boxed{\rightarrow}$ *si* `rouge`.

2 La pertinence dans le choix et l'interprétation d'actions en environnement complètement connu

2.1 Définitions préliminaires

Dans cette partie, nous faisons une hypothèse restrictive forte : l'environnement (présent ou futur) de la prise de décision est complètement connu. Dire que l'environnement est complètement connu du point de vue de l'acteur signifie qu'il connait l'état initial du monde ainsi que les effets des actions, ces dernières étant déterministes (par induction, il connait donc l'état du monde après n'importe quelle suite d'actions). On supposera aussi que l'environnement (comprenant l'ensemble des actions disponibles) est complètement connu *par l'observateur*[3]. Ce dernier connait donc avec précision l'état du monde à tout instant et observe avec précision le comportement de l'acteur, et ceci depuis le début du processus. Cette hypothèse entraîne que l'observateur connait avec précision les croyances (complètes) de l'acteur à tout instant. Seules deux informations peuvent donc être mal connues par l'observateur : (a) les buts de l'acteur et (b) ses intentions, c'est-à-dire la continuation de son plan. Justement, l'utilisation de critères de pertinence va permettre d'inférer des croyances plausibles de l'observateur sur les buts et les intentions de l'acteur. Le *principe de pertinence* signifie informellement que *si l'acteur a fait une action, c'est qu'il a un plan en tête qui a besoin du résultat de cette action.* La suite de l'article vise à formaliser ce principe.

On note $ACT = \{\alpha_1, \ldots, \alpha_n\}$ l'ensemble des actions disponibles pour un processus de prise de décision donné. En environnement complètement connu, un plan est une suite finie d'actions (éventuellement vide), donc un élément de ACT^*. $\pi; \pi'$ est la concaténation de deux plans π etπ' . λ dénote à la fois (sans ce que cela puisse faire surgir des ambiguïtés) le plan vide (ne comprenant aucune action) et l'action identité (qui ne change pas l'état du monde). On dit qu'un plan π_{done} de ACT^* *débute*[4] un plan $\pi \in ACT^*$ si et seulement si il existe $\pi' \in ACT^*$ tel que $\pi = \pi_{done}; \pi'$. Enfin, on note $Develop(\pi_{done})$ l'ensemble des plans commençant par π_{done} (ou encore, des *développements* de π_{done}) : formellement, $Develop(\pi_{done}) = \pi_{done}.ACT^* = \{\pi \in ACT^* \mid \pi_{done}$ débute $\pi\}$.

On fera l'hypothèse que les actions sont toujours exécutables (et, par induction, les plans aussi).

Informellement, une action α est **pertinente** pour un *contexte de prise de décision* donné C s'il existe un plan solution, cohérent avec le contexte C (donc commençant par π_{done}), *non-dominé* pour C, dont la *prochaine* action est α . Il reste à préciser ce que nous entendons précisément par chacun des termes en italique. Commençons par le *contexte*.

Definition 1 (contexte (de prise de décision)) *Un contexte (de prise de décision en environnement totalement connu) est un quintuplet*

$$C = \langle \mathcal{S}, s_0, ACT, next, g, \pi_{done} \rangle$$

[3]On pourrait très étudier les conséquences du choix d'un environnement complètement connu par l'acteur mais pas par l'observateur, mais pas dans cet article, par manque de place (et de temps) ; par contre, le choix d'un environnement complètement connu par l'observateur mais pas par l'acteur sera étudié en section 3)

[4]C'est du mauvais français mais je ne trouve pas mieux.

où : $\mathcal{S}$ est l'ensemble (supposé fini) des états possibles du monde ; $s_0 \in \mathcal{S}$ est l'état initial du monde ; ACT est un ensemble fini d'actions, dont la dynamique est décrite par la fonction de transition $next : \mathcal{S} \times \mathcal{A} \rightarrow \mathcal{S}$, où $next(s, \alpha)$ est l'état successeur de s lorsqu'on a effectué l'action α ; la fonction $next$ s'étend naturellement aux plans (de façon inductive par $next(s, (\alpha; \pi)) = next(next(s, \alpha), \pi)$. $g \subseteq \mathcal{S}$ est l'ensemble des états-buts de l'acteur, appelé plus simplement son but[5] *; $\pi_{done} \in ACT^*$ est le plan que l'acteur a déjà effectué. Un plan $\pi \in ACT^*$ est un* plan solution *pour C si et seulement si $next(s_0, \pi) \in g$. On note $SolPlans(C)$ l'ensemble des plans solutions pour C.*

Pour des raisons de simplicité, on a défini un but comme un sous-ensemble de $\mathcal{S}$ (le but de l'acteur étant de parvenir dans n'importe lequel de ces états) ; un modèle plus général consisterait à considérer un modèle de préférence quantitatif, c'est-à-dire une fonction d'utilité plutôt qu'un simple ensemble d'états-buts. Les définitions qui suivent pourraient être adaptées assez facilement à des buts décrits par une fonction d'utilité (nous y reviendrons à la fin de l'article).

On suppose maintenant que les différents plans solutions sont ordonnés par une *relation de préférence* $\succeq$ (réflexive et transitive, parfois totale)[6]. $\succ$ est la relation de préférence stricte induite par $\succeq$: $\pi \succ \pi'$ si et seulement si $\pi \succeq \pi'$ et non ($\pi' \succeq \pi'$). La convention que nous adoptons est que $\succeq$ va dans le sens de la préférence (si $\pi \succ \pi'$ alors π est préféré à π'). Étant donné un ensemble de plans P et une relation de préférence $\succeq$, un plan π est *non-dominé* (ou *maximal*) dans P au sens de $\succeq$ si et seulement si il n'existe pas de plan π' dans P tel que $\pi' \succ \pi$; on note $Max(P, \succeq)$ l'ensemble des plans non-dominés dans P pour $\succeq$. Si C est un contexte, les *plans préférés* pour C (selon $\succeq$) sont les plans solutions non-dominés *parmi les développements de* π_{done} , c'est-à-dire

$$Pref(C, \succeq) = Max(SolPlans(C) \cap Develop(\pi_{done}), \succeq)$$

[5] Que cela soit bien clair : dire que le but de l'acteur est g signifie qu'il souhaite parvenir à n'importe quel état de g, et qu'une fois que ce sera réalisé, le but sera définitivement atteint. Le but est donc ici (pour rendre les choses plus simples) statique : il ne s'agit pas d'atteindre successivement tous les états de g. En d'autres termes, g est un *but d'accessibilité.*.

[6] Puisque nous avons défini la notion de but de manière binaire, on peut supposer que l'acteur préfère tout plan solution à tout plan non solution (si les préférences de l'acteur sur les états du monde étaient définies par une fonction d'utilité, cette hypothèse ne serait plus aussi raisonnable) ; la relation de préférence est donc destinée à comparer des plans solutions.

Voici des exemples de relations de préférence. Étant donnés deux plans solutions π , π' pour C :

– $\pi \succeq^b \pi'$ est vérifié pour tous plans π et π' (les plans préférés pour C sont tous les plans solutions, sans autre critère de distinction) ;
– $\pi \succeq^c \pi'$ si et seulement si $|\pi| \leq |\pi'|$ (les plans préférés sont les plans solutions les plus courts – cette notion peut être généralisée en considérant des coûts d'action strictement positifs, les plans préférés étant ceux dont le coût cumulé est moindre).
– $\pi \succeq^o \pi'$ si et seulement si pour toute action $\alpha \in ACT$, $occ(\alpha, \pi) \leq occ(\alpha, \pi')$, où $occ(\alpha, \pi)$ est le nombre d'occurrences de α dans π .[7].
– $\pi \succeq^i \pi'$ si et seulement si il existe une fonction strictement croissante σ de $\{1, \ldots, |\pi|\}$ dans $\{1, \ldots, |\pi'|\}$ telle que $\pi(i) = \pi'(\sigma(i))$ (les plans préférés sont simplement les plans solutions qui ne contiennent pas d'actions inutiles).[8].

On vérifie aisément que l'on a les implications suivantes : $\pi \succeq^i \pi' \Rightarrow \pi \succeq^o \pi' \Rightarrow \pi \succeq^c \pi' \Rightarrow \pi \succeq^b \pi'$; $\pi \succ^b \pi' \Rightarrow \pi \succ^i \pi' \Rightarrow \pi \succ^o \pi' \Rightarrow \pi \succ^c \pi'$. Donnons une preuve informelle de cette seconde chaîne d'implications. $\pi \succ^b \pi'$ n'étant jamais vrai, la première implication est triviale. Si $\pi \succ^i \pi'$ alors le plan π' contient toutes les actions de π et dans le même ordre, plus au moins une action supplémentaire α (à une étape quelconque) ; par conséquent, chaque action a au moins autant d'occurrence dans π' que dans π, et α en a strictement plus dans π' que dans π ; on a donc $\pi \succ^o \pi'$. Enfin, si $\pi \succ^o \pi'$ alors π' est nécessairement plus long que π, c'est-à-dire $\pi \succ^c \pi'$.

Par conséquent, α est pertinente pour C selon $\succeq_c \Rightarrow \alpha$ est pertinente pour C selon $\succeq_o \Rightarrow \alpha$ est pertinente pour C selon $\succeq_i \Rightarrow \alpha$ est pertinente pour C selon $\succeq_b$.

Les plans préférés pour C selon $\succeq^b$ sont *tous* les plans solutions, sans autre critère de distinction). C'est donc un critère très prudent (qui ne permet généralement pas d'inférer beaucoup

[7] Un relecteur anonyme m'a fait remarquer que cet ordre s'appelle l'*ordre de Parikh* et je l'en remercie.

[8] Le même relecteur m'a fait remarquer que cet ordre s'appelle l'*ordre de sous-suite*

d'informations). Les plans préférés pour C selon $\succeq^c$ sont les plans solutions les plus courts. Les plans préférés pour C selon $\succeq^i$ sont les plans solutions qui ne contiennent pas d'actions inutiles.

2.2 La pertinence d'une action dans un contexte

Il reste à expliciter la notion de "prochaine action". Nous en arrivons pour cela à la notion de pertinence.

Definition 2 (pertinence) *Une action α est* pertinente *pour le contexte C si et seulement si il existe un plan solution π dans $Pref(C, \succeq)$ tel que $\pi_{done}; \alpha$ débute π .*

La notion de "prochaine action" d'un plan pour un contexte donné est maintenant claire : étant donné un plan π qui commence par le plan déjà effectué π_{done}, c'est tout simplement l'action qui suit immédiatement π_{done} dans un plan non-dominé π commençant par π_{done}. Bien entendu, puisqu'il y a en général plusieurs plans non-dominés pour un contexte donné, il peut très bien y avoir plusieurs actions fortement pertinentes pour C selon $\succeq$. Il peut aussi n'y avoir *aucune* action pertinente pour C selon $\succeq$, puisqu'il peut n'y avoir aucun plan solution commençant par π_{done} .

Exemple 1 (suite) *Initialement,* $L = \langle 25, 10, 7, 5, 3, 1\rangle$ *et* $N_G = 78$.
- $\pi_{done} = \lambda$ *(aucune action n'a encore été effectuée); si l'on choisit la relation de préférence $\succeq^c$, la seule action absolument pertinente est* $25 + 1$ *puisqu'il n'y a qu'un seul plan de longueur minimale, à savoir* $(25 + 1) \times 3$. *Si par contre on choisit la préférence $\succeq^i$, les actions* 10×7, $7 + 1$ *et* $25 + 10$ *sont aussi pertinentes ; mais* $10 + 7$ *ne l'est pas parce qu'il n'existe pas de plan solution où* $10 + 7$ *"serve à quelque chose". Enfin, avec $\succeq^b$,* $10 + 7$ *est pertinente elle aussi (parce qu'elle ne compromet pas la production d'un plan solution) tandis que* 25×10 *ne l'est pas (on ne peut plus atteindre le but après l'avoir exécutée) . Voici un tableau résumant ces résultats.*

	$\succeq^b$	$\succeq^i$	$\succeq^c$
$25 + 1$	*pertinente*	*pertinente*	*pertinente*
10×7	*pertinente*	*pertinente*	*non-pert.*
$10 + 7$	*pertinente*	*non-pert.*	*non-pert.*
25×10	*non-pert.*	*non-pert.*	*non-pert.*

- $\pi_{done} = (10 \times 7)$ *: les actions pertinentes selon $\succeq^i$ et $\succeq^c$ sont* $70 + 5$, $70 + 3$ *et* $5 + 3$.
- $\pi_{done} = (25 \times 10)$. *On vérifie que $Max(SolPlans(C) \cap Develop(\pi_{done}) = \emptyset$ (il n'est plus possible d'atteindre le but après avoir exécuté π_{done}); il n'y a donc aucune action pertinente dans ce contexte (quelle que soit $\succeq$).*

Que l'on infère des croyances plus précises (parce qu'on trouvera moins d'actions pertinentes) avec $\succeq^c$ qu'avec $\succeq^i$ et avec $\succeq^i$ qu'avec $\succeq^b$ n'est pas surprenant : l'hypothèse que l'acteur suit toujours les plans les plus courts est une hypothèse forte, qui suppose que l'acteur a une rationalité parfaite (parce qu'il ne se trompe jamais et trouve *toujours* les plans les plus courts). Les autres relations de préférence supposent cette fois que l'acteur a une rationalité limitée (de plus en plus limitée au fur et à mesure qu'on va vers $\succeq^b$) ; plus la rationalité de l'acteur est considérée comme limitée, plus d'actions sont pertinentes (le cas extrême serait celui d'un acteur absolument pas rationnel, pour lequel *toutes* les actions seraient pertinentes, même celles qui empêchent définitivement l'obtention du but).

2.3 La pertinence dans l'interprétation d'actions

Nous commençons par le cas le plus simple où l'observateur connait aussi les buts de l'acteur et n'infère donc des conclusions plausibles que sur ses intentions.

Le but de l'acteur est connu. Dans ce cas, les données dont l'observateur dispose à tout instant du processus sont : (i) les actions entreprises par l'acteur et la suite d'états du monde depuis l'instant initial jusqu'à l'instant présent ; (ii) l'effet de chaque action dans chaque état ; (iii) le but g de l'acteur, dont on suppose pour simplifier qu'il consiste en un sous-ensemble de l'espace des états du monde. (i) et (ii) impliquent que la donnée de l'état initial du monde s_0 (avant que l'acteur ait entrepris sa première action) et le plan π_{done} poursuivi jusqu'à présent par l'acteur suffisent à déterminer la suite d'états du monde $s_0, \ldots, s_{now}$ depuis le début du processus jusqu'à l'instant présent.

Dans ce cas, l'ensemble des actions dont on peut raisonnablement penser qu'elles peuvent être la prochaine action, sont tout simplement les actions pertinentes pour C selon $\succeq$.

Le but de l'acteur n'est pas connu. Dans ce cas, la définition précédente n'est pas applicable, parce que la préférence entre plans dépend du but (puisqu'un plan solution est préféré à un plan qui ne l'est pas). Il faut donc cette fois comparer des couples constitués par un plan et un but. La définition que nous choisissons consiste à définir un but plausible comme un ensemble d'états g tel que toute action entreprise jusqu'à présent par l'acteur ait été absolument pertinente. Pour tout entier $t < |\pi_{done}|$ on note $Restr(\pi_{done}, t) = (\pi_{done})_{\leq t}$ le plan consistant en les t premières actions de π_{done}. On note $now = |\pi_{done}|$.

Definition 3 *g est un but plausible sachant un contexte partiel $\langle s_0, \pi_{done}, ACT\rangle$ (et une relation de préférence $\succeq$) si et seulement si pour tout instant $t \in \{0, \ldots, now - 1\}$, l'action $\pi_{done}(t)$ entreprise par l'acteur à l'instant t est pertinente pour le contexte $\langle s_0, Restr(\pi_{done}, t), ACT, g\rangle$.*

Cette définition est équivalente à la suivante, qui va nous éclairer sur les propriétés qu'elle vérifie.

Proposition 1 *g est un but plausible sachant $\langle s_0, \pi_{done}, ACT\rangle$ si et seulement si il existe un plan $\pi \in SolPlans(C) \cap Develop(\pi_{done})$ tel qu'il n'existe pas de plan $\pi' \in SolPlans(C)$ vérifiant $\pi' > \pi$.*

Intuitivement, g est donc un but plausible si les meilleurs plans envisageables pour g commencent par π_{done}. Ce résultat a deux corollaires importants. D'abord, il peut arriver qu'il n'y ait aucun but plausible pour un contexte partiel. C'est par exemple ce qui se passe avec l'exemple 2 si le plan déjà effectué par l'acteur est d'aller de A en D puis en C. En fait, ceci risque de se passer dès que l'acteur a un comportement sous-optimal par rapport à la relation de préférence choisie, c'est-à-dire dès que sa rationalité est plus limitée que l'observateur ne l'avait supposé. Ensuite, l'inférence de buts plausibles est monotone : à chaque action entreprise par l'acteur, l'ensemble des buts plausibles diminue (jusqu'à devenir éventuellement vide, en raison du corollaire précédent). Ainsi, dans l'exemple 2, l'ensemble des buts plausibles est initialement l'ensemble des parties non-vides de $\{A, B, C, D, E, F, G\}$; après avoir observé l'acteur aller en E, l'ensemble des buts plausibles devient $\{\{E, F\}, \{E\}, \{F\}\}$; si l'acteur va ensuite en F, il se réduit alors à $\{\{F\}\}$, pour devenir vide si l'acteur entreprend ensuite une quelconque action autre que l'action vide λ .

Cette définition peut paraître trop forte, puisqu'elle ne laisse aucune place à des plans qui seraient "presque" optimaux pour g, mais il faut bien voir qu'il n'est pas aisé d'échapper à ce qui précède. On pourrait éviter cet écueil en définissant une notion *relative* de plausibilité, c'est-à-dire une relation "est un but au moins aussi plausible que" sur $2^{\mathcal{S}} \setminus \emptyset$. Cependant, pour dériver une telle relation, il ne suffit pas d'une relation de préférence sur les plans $\succeq$ mais il faut une relation de préférence sur les couples (plan, but) – (π, g) préféré à (π', g') signifiant que le plan π est plus pertinent par rapport au but g que le plan π' ne l'est par rapport au but g'[9].

Si la relation de préférence $\succeq$ est totale, une deuxième propriété de l'inférence de buts plausibles est que l'ensemble des buts plausibles pour un contexte donné est clos pour l'union :

Proposition 2 *Soit $\succeq$ une relation de préférence totale et soient $g_1 \subseteq \mathcal{S}$, $g_2 \subseteq S$ deux buts plausibles pour un contexte partiel donné, selon $\succeq$. Alors $g_1 \cup g_2$ est un but plausible selon $\succeq$.*

Par conséquent, lorsque $\succeq$ est totale, l'ensemble des buts plausibles pour un contexte donné s'exprime toujours comme l'ensemble des unions d'un ensemble de buts élémentaires, que l'on appellera la *base*.

[9]Par exemple, dans le cas où la préférence entre plans est mesurable, c'est-à-dire qu'il existe une fonction de coût $K : ACT^* \rightarrow \boldsymbol{R}^+$ telle que $\pi \succeq \pi'$ si et seulement si $K(\pi) \leq K(\pi')$ (ce qui est le cas avec $\succeq^c$ pour $K(\pi) = |\pi|$), alors on pourrait adopter la définition suivante : soit $\pi^*(g)$ un plan solution pour g préféré selon $\succeq$, alors on définit $Q(\pi, g) = \frac{K(\pi)}{K(\pi^*(g))}$ (avec les conventions $\frac{0}{0} = 1$ et pour tout $x >$), $\frac{x}{0} = +\infty$) ; ensuite, $R(g, C) = \min\{Q(\pi, g) \mid \pi \in SolPlans(C) \cup Develop(\pi_{done})\}$ et enfin : g est un but au moins aussi plausible que g' (étant donné C et selon $\succeq$) si et seulement si $R(g, C) \leq R(g', C)$. On voit que cela n'est pas simple et par manque de place, on n'ira pas plus loin dans cette direction.

Cette propriété ne tient plus si $\succeq$ n'est pas totale, comme on peut le voir sur le contre-exemple suivant : soit $\mathcal{S} = \{s_0, s_1, s_2, s_3\}$, $\mathcal{A} = \{\alpha, \beta, \gamma\}$ et la fonction de transition

	α	β	γ
s_0	s_1	s_3	s_2
s_1	s_1	s_2	s_3
s_2	s_2	s_2	s_2
s_3	s_3	s_3	s_3

Soit $\succeq=\succeq^i$ et $\pi_{done} = \alpha : \{s_2\}$ est un but plausible puisque $\alpha;\beta \in Pref(\succeq^i, SolPlans(\{s_2\}))$, et $\{s_3\}$ est un but plausible puisque $\alpha;\gamma \in Pref(\succeq^i, SolPlans(\{s_3\}))$. Par contre $\{s_2, s_3\}$ n'est pas un but plausible, puisque $Pref(\succeq^i, SolPlans(\{s_2, s_3\}))$ contient seulement les deux plans β et γ, et donc, aucun plan ne débutant par α.

Une autre propriété qui ne tient pas, même si $\succeq$ est totale, est que si g_1 est un but plausible et $g_2 \supseteq g_1$ alors g_2 est un but plausible : il suffit de considérer l'exemple précédent avec cette fois $\succeq=\succeq^c$, $\pi_{done} = \alpha : \{s_1\}$ est un but plausible mais pas $\{s_0, s_1\}$.

3 La pertinence dans le choix et l'interprétation d'actions en environnement incomplètement connu

Cette fois, nous ne supposons plus que l'acteur a une connaissance parfaite de son environnement : en particulier, l'état du monde à tout instant peut être mal connu et les actions peuvent être non-déterministes. Un contexte de prise de décision est cette fois un sextuplet

$$C = \langle \mathcal{S}, b_0, ACT, next, g, \pi_{done} \rangle$$

où b_0 est l'état initial des *croyances* de l'acteur sur l'état du monde et π_{done} le plan déjà réalisé.

La définition formelle d'un état de croyance b dépend des hypothéses de modélisation du processus. Pour faire le plus court possible, nous faisons ici l'hypothèse la plus courante que les états de croyance sont *probabilistes* : : b est une distribution de probabilité sur S.

On distingue (de façon usuelle) (comme souvent) deux types d'actions, selon que leurs effets portent sur l'état du monde ou seulement sur celui trajectoire observable passée (on va y revenir). des croyances de l'acteur. Une action *physique* (ou *ontique*) est modélisée par une fonction de transition ; on peut considérer pour ces fonctions de transition la même taxonomie que pour les effets des actions : ainsi, les actions (ontiques) déterministes sont modélisées par une fonction de transition déterministe $next : \mathcal{S} \times \mathcal{A} \to \mathcal{S}$, et, plus généralement, les actions (ontiques) *stochastiques* sont modélisées par des probabilités de transition $p(.|s, a)$ sur $\mathcal{S}$. Les actions (purement) épistémiques, elles, n'ont des effets que sur les croyances de l'acteur (et pas sur l'état du monde). Pour faire simple, on ne considérera ici que des actions de *tests élémentaires*, dont l'effet est d'apprendre à l'acteur la valeur de vérité d'une certaine variable (et on ne considérera pas non plus d'actions à la fois ontiques et épistémiques – ceci n'entraîne pas de perte de généralité, ces actions complexes pouvant être décomposées en une action ontique suivie d'une action épistémique – voir [6]). On décompose ACT et $ACT_E \cup ACT_P$, où ACT_E (resp. ACT_P) est l'ensemble des actions épistémiques (resp. ontiques) de ACT.

En environnement incomplet et partiellement observable, dès que les actions peuvent renvoyer un feedback (ce qui est le cas pour les actions épistémiques), les plans sont conditionnels. L'ensemble des plans conditionnels $CondPlans(C)$ pour un contexte de prise de décision C est défini récursivement comme suit : (i) $\lambda \in CondPlans(C)$; (ii) pour toute action $\alpha \in ACT_P$, $\alpha \in CondPlans(C)$; (iii) pour tous π , $\pi' \in CondPlans(C)$, $(\pi; \pi') \in CondPlans(C)$; (iv) pour toute action épistémique $\alpha = test(x)$ et pour tous π , $\pi' \in CondPlans(C)$, $[\alpha\,;\ \texttt{if}\ x\ \texttt{then}\ \pi\ \texttt{else}\ \pi'\ ] \in CondPlans(C)$.

Le plan π_{done} déjà effectué par l'acteur est tout simplement la suite des actions (ontiques et épistémiques) que l'acteur a déjà effectuées – sans tenir compte des observations. Il n'y a pas lieu ici de tenir compte des branchements sur les observations, puisque ce plan *a déjà eu lieu* : π_{done} est donc un plan inconditionnel.

Ce choix de ne pas tenir compte des observations faites par l'acteur dans la connaissance de l'observateur (sur le passé du comportement de l'acteur) suppose que les effets des actions épistémiques observés par l'acteur ne sont pas observés directement par l'observateur (ils peuvent cependant être inférés de son comportement – voir l'exemple 3)[10].

La *probabilité de succès* d'un plan π (pour le contexte C) est la probabilité que l'état final obtenu après l'exécution de π soit dans g.

Il faut maintenant revoir la notion de plan (inconditionnel) débutant un autre plan, ce qui est l'objet de la définition récursive suivante.

Definition 4 *Soit π_{done} un plan inconditionnel et $\pi \in CondPlans(ACT)$. π_{done} débute π si et seulement si l'une de ces conditions est vérifiée :*

1. *$\pi_{done} = \lambda$;*
2. *$\pi_{done} = \alpha; \pi'$, $\pi = \alpha; \pi''$, avec $\alpha \in ACT_P$ et π' débute π'' ;*
3. *$\pi_{done} = (test(x); \pi')$, $\pi = (test(x);$ `if` x `then` π_1 `else` $\pi_2)$ avec $test(x) \in ACT_E$ et π' débute soit π_1 soit π_2.*

Il reste à définir des relations de préférence entre plans. Le critère le plus simple est celui de l'utilité espérée. Pour simplifier, et pour rester en accord avec l'hypothèse de "planification dirigée vers les buts" que nous avons faite en Section 2, on supposera que le coût des actions est toujours négligeable devant l'utilité positive (récompense) obtenue par la réalisation du but. Comme on a fait également l'hypothèse (implicite) que les plans ne contiennent pas de boucles (ou itérations non bornées), les plans sont tous finis. Sous ces hypothèses, *les plans préférés seront toujours un sous-ensemble des plans qui maximisent la probabilité d'atteindre le but.* Il reste maintenant à définir des relations de préférence entre ces plans. En voici quelques-unes, qui sont des généralisations des des relations de préférence $\succeq^i$, $\succeq^o$ et $\succeq^c$ (notons que la définition de $\succeq^b$ est applicable telle quelle, sans avoir besoin d'être revue). Pour toutes les définitions qui suivent, on suppose que chaque action (ontique ou épistémique) α a un coût positif $c(\alpha)$; le critère de la longueur est obtenu en prenant tous ces coûts égaux à 1.

- $\pi \succeq^{blpc} \pi'$ si et seulement si le coût de la branche la plus coûteuse de π est inférieur ou égal au coût de la branche la plus coûteuse de π' (le coût d'une branche étant la somme des coûts des actions qu'elle comprend).
- $\pi \succeq^{eu} \pi'$ si et seulement si le coût moyen de π est inférieure ou égale au coût moyen de π' , où le coût moyen $K(\pi)$ d'un plan est défini récursivement comme suit :
  - $K(\lambda) = 0$;
  - si $\alpha \in ACT_P$: $K(\alpha; \pi') = c(\alpha) + l(\pi')$;
  - si $\alpha = test(x) \in ACT_E$: $K(test(x);$ `if` x `then` π' `else` $\pi'') = c(\alpha) + Prob(x).K(\pi') + Prob(\neg x).K(\pi'')$, où $Prob(x) = \sum_{s \models x} p(s)$ est la probabilité a priori d'obtenir le résultat x.
- $\pi \succeq^{og} \pi'$ si et seulement si pour toute action α, le nombre moyen d'occurrences de α dans π est inférieur ou égal au nombre moyen d'occurrences de α dans π' ;
- $\pi \succeq^{ig} \pi'$ si et seulement si l'une de ces conditions est vérifiée :
  - $\pi = \lambda$;
  - $\pi = \alpha; \pi_1$, $\pi' = \alpha; pi_2$ et $\pi_1 \succeq^{ig} \pi_2$, où $\alpha \in ACT_P$.
  - π et π' ne comportent pas de branchements (donc pas d'actions épistémiques) et $\pi \succeq^i \pi'$;
  - $\pi = (test(x);$ `if` x `then` π_1 `else` $\pi_2)$ et $\pi' \in \{\pi_1, \pi_2\}$;
  - $\pi = (test(x);$ `if` x `then` π_1 `else` $\pi_2)$, $\pi' = (test(x);$ `if` x `then` π'_1 `else` $\pi'_2)$, et $\pi_1 \succeq^{ig} \pi'_1$, $\pi_2 \succeq^{ig} \pi'_2$.

Notons que $\succeq^{lm}$ et $\succeq^{blpc}$ sont totales, mais pas $\succeq^{ig}$ ni $\succeq^{og}$. $\succeq^{ig}$ et $\succeq^{og}$ sont intéressantes si les coûts des actions (pour l'acteur) ne sont pas (ou sont mal) connues de l'observateur. On a les propriétés suivantes :

Proposition 3

1. *$\pi \succ^{ig} \pi' \Rightarrow \pi \succ^{og} \pi' \Rightarrow \pi \succ^{eu} \pi'$; $\pi \succ^{ig} \pi' \Rightarrow \pi \succ^{blpc} \pi'$. ($\succeq^{eu}$ et $\succeq^{blpc}$ sont incomparables, ainsi que $\succeq^{og}$ et $\succeq^{blpc}$).*
2. *si l'environnement est complètement connu et qu'en conséquence on restreint $\succeq^{lm}$, $\succeq^{blpc}$, $\succeq^{og}$ et $\succeq^{ig}$ aux seuls plans inconditionnels, alors $\succeq^{eu}$ et $\succeq^{blpc}$ sont toutes deux égales à $\succeq^c$, $\succeq^{ig}$ est égale à $\succeq^i$et $\succeq^{og}$ est égale à $\succeq^o$.*

Il reste maintenant à montrer comment on peut inférer des croyances plausibles sur les croyances de l'acteur, sur ses buts, ses intentions ou sur l'état du monde. Le principe est le même qu'en Section 2 :

[10]Sinon, le formalisme serait encore un peu plus complexe, puiqeu'il faudrait, à la place du plan passé π_{done} , avoir une *trajectoire observable passée* τ_{done} comprenant des actions ontiques et des couples (action épistémique, observation – nous laissons ceci pour des travaux ultérieurs).

Definition 5 *Soit* $C = \langle \mathcal{S}, b_0, ACT, next, g, \pi_{done} \rangle$ *un contexte,* p *une distribution de probabilité sur S et* $g \subseteq S$. (p, g) *est plausible pour* C *selon* $\succeq$ *si et seulement si il existe un plan* π, *maximisant la probabilité d'atteindre* g, *non-dominé selon* $\succeq$ *parmi les plans qui maximisent la probabilité d'atteindre* g, *et tel que* π_{done} *débute* π.

Exemple 3 (suite)

- *L'acteur va de* A *en* D *puis en* C : $\pi_{done} = allerenD; allerenC$. *On peut vérifier (ce qui n'est pas si simple !) que les seuls états de croyance (de l'auteur sur l'état du monde, et par transposition, de l'observateur sur l'état du monde) qui sont plausibles (pour* $\succeq^{eu}$*) sont ceux où l'acteur a appris, lorsqu'il était en* C, *que* CD *était bloqué.*
- *L'acteur va de* A *en* C *puis en* D : $\pi_{done} = allerenC; allerenD$. *Les états de croyance qui sont plausibles (selon* $\succeq^{eu}$*) sont les suivants :*
  - AD *et* CG *sont bloqués : dans ce cas, un plan non-dominé (selon* $\succeq^{eu}$*) consiste à aller ensuite en* G *si* CG *n'est pas bloqué, et sinon à retourner en* A *(directement si c'est possible, par* D *sinon) et à essayer d'atteindre* G *par le chemin* $AEFG$;
  - CG *est bloqué et* AD *ne l'est pas, mais la probabilité initiale de l'acteur pour que* DG *fût bloqué était bien plus forte que celle pour que* CG *le fût. L'expression générale est complexe et nous l'omettons et nous donnons juste un exemple : dans le cas où on suppose que l'on sait dés le départ que* CD *n'est pas bloqué, tout état de croyance où* $p(DG \text{ bloqué}) \geq 0.9$ *et* $p(CG\text{bloqué}) \leq \frac{17}{30}$ *est plausible.*

Nous omettons les détails en ce qui concerne l'exemple 4. Le lecteur pourra vérifier que les résultats obtenus avec $\succeq^{eu}$ en prenant par exemple comme coût des actions le double du coût de `regarder` , que les résultats obtenus sont en accord avec l'intuition.

4 Travaux connexes et conclusions

Je ne connais pas de travail qui s'attaque exactement au type de problème considéré dans cet article. J'en connais par contre qui concernent certaines des notions-clé de cet article (pertinence ; plans minimaux ; reconnaissance de plan ; raisonnement sur les croyances, buts et intentions d'un agent).

4.1 Pertinence et dialogue

Les linguistes se sont attachés à montrer que le choix d'actes de langages dans le dialogue et le discours sont guidés par des critères de pertinence qui tiennent compte de la qualité du message produit et de critères plus quantitatifs [11, 5] Bien que les développements techniques soient fort différents, en raison de la différence entre le contexte du dialogue et celui de l'observation passive que nous considérons ici, ces théories ne sont pas sans liens avec ce qu'on a proposé ici : non seulement les définitions de pertinence données dans cet article mélangent qualité (l'action doit pouvoir mener au but) et quantité (pas de redondances) tout comme les théories linguistiques. Enfin et surtout, le point de départ est le même : dans les deux cas, l'observateur ou l'interlocuteur utilise l'hypothèse que l'acteur (ou son interlocuteur) est pertinent dans ses choix pour inférer des croyances sur ses croyances, buts et intentions. .

4.2 Pertinence et planification

Lin [9] propose des critères d'evaluation de la qualité d'un plan qui sont proches des notions de préférence entre plans (notamment $\succeq^i$). D'un côté, notre travail (qui se place certes dans une perspective différente) apporte des compléments à l'article de Lin, en étudiant le complexité de l'un de ces critères et en l'étendant à la planification en environnement incomplètement connu. Inversement, l'article de Lin peut nous apporter (pour des travaux futurs) des critères alternatifs de mesure de non-redondance d'un plan, avec leurs caractérisations et leur expression en calcul des situations.

4.3 La reconnaissance de plans et la prédiction d'actions

L'approche la plus proche de la nôtre est probablement le modèle de prédiction d'action proposé dans la Section 4 de [2]. Les intuitions sous-jacentes à leur approche et à celle qui est développée ici sont similaires, mais les différences techniques sont importantes. D'abord, [2] ne raisonnent pas sur les buts de l'acteur. Ensuite, ils ne discutent pas du choix d'une relation de préférence pertinente (mais fixent une fois pour toute un critère issu de la théorie qualitative de la décision qui est le sujet du reste de leur article).

Une autre ligne de travail qui s'approche de celle nous avons suivie dans cet article est la *reconnaissance de plans* (voir par exemple [8, 1]. La différence essentielle avec le travail proposé ici est que la reconnaissance de plans considère comme input une histoire de plans déjà exécutés par l'agent en de diverses circonstances, ou alors une bibliothèque de plan pré-calculée (et il serait insensé – computationnellemment parlant – de les générer tous à partir d'une description implicite des plans possibles !) ; puis, à partir d'une séquence initiale, il s'agit de déterminer le plan suivi par l'agent, et donc de prévoir ses actions futures (voir tout spécialement [3, 4]).

La *reconnaissance de but* [7], contrairement à la reconnaissance de plans, ne nécessite pas la présence d'une historique ni d'une bibliothèque de plans mais permet de travailler avec une description implicite de l'ensemble des plans disponibles, et s'approche en ceci de notre travail. Cependant, il s'en éloigne en cela que le but de la reconnaissance de buts est davantage d'interpréter des actions passées (il s'agit avant tout de savoir détecter quel but est atteint, ou du moins partiellement atteint) que de prédire des actions futures ; de surcroît, la base de cette reconnaissance de buts est une graphe causal entre actions et variables, et pas du tout une notion de pertinence induite par une relation de préférence entre plans.

Enfin, les approches pour la reconnaissance de plans ou de buts ne considèrent pas d'environnements de croyances incomplètes, ni donc d'actions épistémiques et de plans conditionnels, et ne permettent donc pas non plus d'apprendre quelque chose sur les *croyances* de l'agent.

Remerciements

Je n'aurais jamais écrit cet article sans le projet "Planification d'actions : de la validation psychologique et linguistique à la programmation d'agents autonomes en intelligence artificielle" du programme *Cognitique* financé par le CNRS et le Ministère de la Recherche. Merci aussi à Andreas Herzig, Philippe Muller et Eric Raufaste pour des commentaires fort utiles. Enfin, je remercie les relecteurs pour leur lecture perspicace, à laquelle la version finale de l'article doit beaucoup.

Références

[1] M. Bauer and G. Paul. Logic-based plan recognition for intelligent help systems. In Ch. Bäckström and E. Sandewall, editors, *Current Trends in AI Planning*, pages 60–73. IOS Press, 1993.

[2] R. Brafman and M. Tennenholtz. Modeling agents as qualitative decision makers. *Artificial Intelligence*, 94, 1997.

[3] B. D. Davison and H. Hirsh. Predicting sequences of user actions. In *Proceedings of the 1998 AAAI/ICML Workshop "Predicting the Future : AI Approaches to Time Series Analysis"*, 1998.

[4] P. Gorniak and D. Poole. Predicting future user actions by observing unmodified assumptions. In *Seventeenth National Conference on Artificial Intelligence (AAAI-2000)*, 2000.

[5] H.-P. Grice. *Logic and conversation.* Academic Press Edition, 1975.

[6] A. Herzig, J. Lang, D. Longin, and T. Polacsek. A logic for planning under partial observability. In *Proceedings of AAAI'2000*, pages 768–773, 2000.

[7] Jun Hong. Goal recognition through goal graph analysis. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 15 :1–30, 2001.

[8] H. Kautz and J. Allen. Generalized plan recognition. In *Proceedings of AAAI-86*, pages 32–37, 1986.

[9] F. Lin. On measuring plan quality (a preliminary report). In *Proceedings of KR'98*, pages 224–232, 1998.

[10] M. P. Singh, A. S. Rao, and M. P. Georgeff. *Multiagent Systems – A Modern Approach to Distributed Artificial Intelligence*, chapter Formal Methods in DAI : Logic-Based Representation and Reasoning, pages 331–376. MIT Press, 1999.

[11] D. Sperber and D. Wilson. *Relevance : Communication and Cognition.* Harvard University Press, 1986.