

Intelligence Artificielle



Inférence

Alain Boucher

Institut de la Francophonie pour l'Informatique (IFI, Vietnam)
alain.boucher(*arobas*)auf.org

Cours préparé pour
l'Institut de Technologie du Cambodge (ITC)



Inférence en logique des propositions et logique des prédicats

Conséquence logique

- Jusqu'à présent, nous ignorions la valeur de vérité des propositions manipulées. Maintenant, nous allons **donner une valeur de vérité** aux propositions et utiliser cette connaissance pour déduire de nouvelles propositions.
- La notion de **conséquence logique** est destinée à exprimer le fait qu'une proposition donnée est nécessairement vraie lorsqu'un ensemble d'autres propositions le sont.
- Par exemple, si l'on sait que **A est vrai** et que **B est vrai**
 - on en déduit que **$A \wedge B$ est vrai**
- De même si l'on sait que **$A \vee B$ est vrai** et que **$\neg B$ est vrai**
 - on en déduit que **A est vrai**

Inférence logique

- **Inférence logique** :
 - Nous avons une série de propositions qui sont **vraies** (*prémisses*)
 - Nous déduisons de **nouveaux faits vrais** de celles-ci (*conclusion*)
- Exemple :
 - **Prémisses** (propositions vraies)
 - $A \Rightarrow B$: Si Jean est sage, alors Jean ira au cinéma
 - A : Jean est sage
 - **Conclusion** (fait déduit)
 - B : Jean ira au cinéma
 - On note l'inférence par \models
 - $\{A \Rightarrow B, A\} \models B$
- Par inférence, nous déduisons de nouvelles propositions qui sont des conséquences logiques des propositions initiales.

La base de connaissances

- Nous allons utiliser le concept de **base de connaissances**.
 - Toutes les connaissances possédées sur le monde et sa structure.
- La **Base de Connaissances (BC)** est composée
 - d'une **base de faits**
 - d'une **base de règles**
- **L'inférence** est l'utilisation des faits et des règles pour trouver de nouveaux faits
 - donc de nouvelles connaissances

Règles d'inférence

- Règles d'inférence (règles de dérivation) : **opérateur d'inférence** \models
 - **Modus ponens** (*implication - élimination*)
 - Si A et $(A \Rightarrow B)$ alors on déduit B
 - On note $\{A, A \Rightarrow B\} \models B$
 - **Modus tollens**
 - Si $\neg B$ et $(A \Rightarrow B)$ alors on déduit $\neg A$
 - On note $\{\neg B, A \Rightarrow B\} \models \neg A$
 - **Enchaînement**
 - Si $A \Rightarrow B$ et $B \Rightarrow C$ alors on déduit $A \Rightarrow C$
 - On note $\{A \Rightarrow B, B \Rightarrow C\} \models A \Rightarrow C$

Règles d'inférence - explications

- Dans l'inférence, on recherche des **vérités**

- Exemple avec **Modus ponens**
 - Si A et $(A \Rightarrow B)$ alors on déduit B .
 - On note $\{A, A \Rightarrow B\} \models B$

Cela signifie que

- $A = \text{vrai}$
- $(A \Rightarrow B) = \text{vrai}$

Donc

- $B = \text{vrai}$

- Table de vérité de \Rightarrow

A	B	$(A \Rightarrow B)$
F	F	V
F	V	V
V	F	F
V	V	V

3 vérités possibles

Une seule vérité pour $A = \text{vrai}$.

Règles d'inférence - suite

- **Élimination du ET**
 - Si A et $(A \wedge B)$ alors on déduit B
 - On note $\{A, A \wedge B\} \models B$

- **Introduction du ET**
 - Si A et si B alors on déduit $A \wedge B$
 - On note $\{A, B\} \models A \wedge B$

- **Introduction du OU**
 - Si A on déduit $A \vee B$
 - On note $\{A\} \models A \vee B$

Introduction libre de nouvelles variables

Déduction - exemples

- **Inférez (ou simplifiez)** $\{p, \neg r, p \Rightarrow (q \Rightarrow r)\}$
 - on déduit par modus ponens : $q \Rightarrow r$
 - puis par modus tollens : $\neg q$
 - donc $\{p, \neg r, p \Rightarrow (q \Rightarrow r)\} \models \neg q$.
- **Prouvez que** $\{A \vee B, \neg B \vee C\} \models A \vee C$
 - (1) $(A \vee B) \Leftrightarrow (\neg A \Rightarrow B)$
 - (2) $(\neg B \vee C) \Leftrightarrow (B \Rightarrow C)$
 - Donc $\{A \vee B, \neg B \vee C\} \Leftrightarrow \{\neg A \Rightarrow B, B \Rightarrow C\}$
 - Par la règle d'enchaînement, on déduit que
 - $\{\neg A \Rightarrow B, B \Rightarrow C\} \models A \vee C$
- **Attention** : ces exemples ne sont valables que parce qu'on sait que les propositions de base sont vraies !!

Cours d'intelligence artificielle

9

Instanciation universelle

- On peut substituer une variable par une constante.
 - $\forall x \alpha \models \text{SUBST}(\{x/C\}, \alpha)$
- Exemple :
 - $\forall x \text{Aime}(x, \text{fruits})$Substitution de x par Jean (noté $\{x/\text{Jean}\}$)
 - $\text{Aime}(\text{Jean}, \text{fruits})$

Cours d'intelligence artificielle

10

Instanciation existentielle

- Pour toute phrase α , variable x et constante c qui n'apparaît nulle part ailleurs dans la base de connaissances :
 - $\exists x \alpha \models \text{SUBST}(\{x/C\}, \alpha)$
- Exemple :
 - $\forall x \text{Aime}(x, \text{fruits})$Substitution de x par C_1 (noté $\{x/C_1\}$)
 - $\text{Aime}(C_1, \text{fruits})$A la condition que C_1 ne soit pas dans la base de connaissances.

Remarques sur l'instanciation

- L'instanciation universelle peut être appliquée *plusieurs fois* pour ajouter de nouvelles phrases.
 - La nouvelle BC est *logiquement équivalente* à l'ancienne.
- L'instanciation existentielle ne peut être appliquée *qu'une fois* pour remplacer une phrase existentielle.
 - La nouvelle BC n'est pas équivalente à l'ancienne, mais elle est *satisfiable* si l'ancienne était *satisfiable*.

Réduction à une inférence propositionnelle

- Supposons que la base de connaissances ne contient que :
 - $\forall x \text{ Roi}(x) \wedge \text{Avide}(x) \Rightarrow \text{Malveillant}(x)$
 - $\text{Roi}(\text{Jean})$
 - $\text{Avide}(\text{Jean})$
 - $\text{Frère}(\text{Richard}, \text{Jean})$
- Si on instancie la phrase universelle de toutes les manières possibles :
 - $\text{Roi}(\text{Jean}) \wedge \text{Avide}(\text{Jean}) \Rightarrow \text{Malveillant}(\text{Jean})$
 - $\text{Roi}(\text{Richard}) \wedge \text{Avide}(\text{Richard}) \Rightarrow \text{Malveillant}(\text{Richard})$
 - $\text{Roi}(\text{Jean})$
 - $\text{Avide}(\text{Jean})$
 - $\text{Frère}(\text{Richard}, \text{Jean})$
- Cette nouvelle base de connaissances ne contient que des propositions.

Réduction à une inférence propositionnelle

- On peut transformer la BC sous forme propositionnelle et appliquer la technique de résolution pour obtenir la réponse.
 - Cette méthode est complète, i.e. toutes les phrases dérivables peuvent être prouvées.
- Le problème, c'est que la méthode est semi-décidable :
 - L'algorithme peut toujours dire oui, si la phrase est dérivable.
 - Mais, l'algorithme boucle à l'infini sinon.

Réduction à une inférence propositionnelle

- En rendant la BC sous forme propositionnelle, on ajoute des phrases non pertinentes.
 - $\forall x \text{ Roi}(x) \wedge \text{Avide}(x) \Rightarrow \text{Malveillant}(x)$
 - $\text{Roi}(\text{Jean})$
 - $\forall y \text{ Avide}(y)$
 - $\text{Frère}(\text{Richard}, \text{Jean})$
- Il est évident que $\text{Malveillant}(\text{Jean})$, mais on produit aussi beaucoup de faits non pertinents comme $\text{Avide}(\text{Richard})$.

Chaînage avant et arrière

Le chaînage avant

- Le mécanisme du **chaînage avant** est très simple :
 - pour **déduire** un fait particulier, on **déclenche les règles** dont les **prémisses sont connues** jusqu'à ce que **le fait à déduire soit également connu** ou **qu'aucune règle ne soit plus déclenchable**.

Algorithme du chaînage avant

```
ENTREES :    BF (base de faits),
             BR (bases de règles (R)),
             F  (fait que l'on cherche à établir)
DEBUT
  TANT QUE F n'est pas dans BF  ET
    QU'il existe dans BR une règle applicable
  FAIRE
    - choisir une règle applicable R (étape de résolution de
      conflits, utilisation d'heuristiques, de métarègles)
    - BR = BR - R (désactivation de R)
    - BF = BF union conclusion(R) (déclenchement de la règle
      R sa conclusion est rajoutée à la base de faits)
  FIN DU TANT QUE
  SI F appartient à BF
  ALORS
    F est établi
  SINON
    F n'est pas établi
FIN
```

Chaînage avant : exemple

- Soit
 - $BF = \{B, C\}$,
 - $Fait = H$ et
 - BR composée des règles :
 - Si B et D et E alors F
 - Si G et D alors A
 - Si C et F alors A
 - Si B alors X
 - Si D alors E
 - Si X et A alors H
 - Si C alors D
 - Si X et C alors A
 - Si X et B alors D
- L'algorithme précédent appliqué à ces paramètres prouve que H se déduit de la base de connaissances.

Cours d'intelligence artificielle

19

Chaînage avant : remarques

- L'algorithme de chaînage avant **s'arrête toujours**.
- Si l'on utilise des règles dont les conclusions peuvent être des faits *négatifs*, pour tout fait F , il peut se produire 4 situations :
 1. $F \in BF$: le fait est établi.
 2. $\neg F \in BF$: la négation du fait est établie.
 3. $\text{ni } F, \text{ ni } \neg F \text{ ne sont dans } BF$: le système ne déduit rien à propos du fait. C'est une *troisième* valeur de vérité qui apparaît naturellement et dont l'interprétation peut être diverse selon les cas.
 4. $F \text{ et } \neg F \in BF$: la base est incohérente. On peut prévoir un fait *Base_incohérente* et une méta-règle de la forme
 - **si** il existe un fait qui appartient, ainsi que sa négation, à BF
alors *Base_incohérente*.
- Le fait à établir peut ne pas être connu. Une étape de *saturation* de la BC consiste alors à déduire tous les faits déductibles.

Cours d'intelligence artificielle

20

Le chaînage arrière

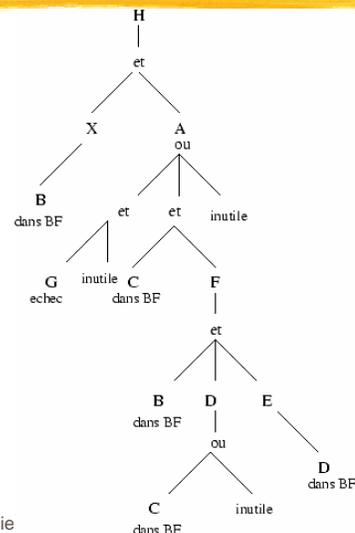
- Le mécanisme de **chaînage arrière** consiste à :
 - partir du fait que l'on souhaite établir, à rechercher toutes les règles qui concluent sur ce fait, à établir la liste des faits qu'il suffit de prouver pour qu'elles puissent se déclencher puis à appliquer *récurivement* le même mécanisme aux faits contenus dans ces listes.
- L'algorithme de chaînage arrière est nettement plus compliqué que celui du chaînage avant et nous nous contenterons d'étudier un exemple.
- L'exécution de l'algorithme de chaînage arrière peut être décrit par un arbre dont les noeuds sont étiquetés soit par un fait, soit par un des deux mots *et*, *ou*. On parle **d'arbre et-ou**.

Cours d'intelligence artificielle

21

Chaînage arrière : exemple 1

- Soit
 - $BF = \{B, C\}$,
 - $Fait = H$ et
 - BR composée des règles :
 - Si **B** et **D** et **E** alors **F**
 - Si **G** et **D** alors **A**
 - Si **C** et **F** alors **A**
 - Si **B** alors **X**
 - Si **D** alors **E**
 - Si **X** et **A** alors **H**
 - Si **C** alors **D**
 - Si **X** et **C** alors **A**
 - Si **X** et **B** alors **D**



Cours d'intelligence artificielle

Chaînage arrière : interactivité

- Si les faits déjà examinés ne peuvent pas être mémorisés (par exemple parce qu'ils sont trop nombreux), l'algorithme de chaînage arrière **peut boucler**.
- On peut enrichir l'algorithme de chaînage arrière en tenant compte du caractère *demandable* ou non d'un fait.
 - Dans ce cas, lorsqu'un fait *demandable* n'a pas encore été établi, le système le demandera à **l'utilisateur** avant d'essayer de le déduire d'autres faits connus.
 - Mais pour que ce mécanisme soit efficace, il faut que l'inférence soit capable de déterminer quelles sont les **questions pertinentes**.
 - Et ce problème est loin d'être simple.

Cours d'intelligence artificielle

23

Chaînage arrière : exemple 2

- Considérons par exemple la base de règles suivante :
 - **Si B et C alors A**
 - **Si D et E alors A**
 - **Si F et G alors A**
 - **Si I et J alors G**
 - **Si J alors $\neg E$**

On suppose que les faits **B, D, F** et **I** sont les seuls **faits demandables**.
La mémoire de travail (*BF*) est initialisée avec l'information : **J est vrai**.

- La question posée au système est : **A est-il vrai ?**
- Quelles sont les **questions pertinentes (utiles)** à poser ?

Cours d'intelligence artificielle

24

Chaînage arrière : exemple 2

- Quelles sont les questions pertinentes (utiles) à poser à l'utilisateur ?
 - "**B est-il vrai**" n'est pas une question pertinente.
 - En effet, aucune règle ne conclut sur *C* qui n'est pas demandable. Comme le fait *B* ne peut être utilisé qu'avec *C*, la valeur de vérité de *B* n'apportera aucune information sur celle de *A*.
 - "**D est-il vrai**" n'est pas une question pertinente.
 - En effet, comme on sait que *J* est vrai, que cela implique que *E* est faux et que *D* n'est utilisé qu'avec *E*, la valeur de vérité de *D* est inutile pour connaître celle de *A*.
 - "**F est-il vrai**" est pertinente.
 - En effet, le fait *G* est encore déductible. Mais si la réponse à cette question est *NON*, la question "**I est-il vrai**" n'est plus pertinente car la valeur de *G* ne sert plus à rien.

Cours d'intelligence artificielle

25

Le chaînage mixte

- L'algorithme de **chaînage mixte** combine, comme son nom l'indique, les algorithmes de *chaînage avant* et de *chaînage arrière*.
- Son principe est le suivant :

ENTREE : F (à déduire)

DEBUT

TANT QUE F n'est pas déduit mais peut encore l'être

FAIRE

- Saturer la base de faits par chaînage AVANT
(c'est-à-dire, déduire tout ce qui peut être

déduit)

- Chercher quels sont les faits encore déductibles

- Déterminer une question pertinente à poser à

l'utilisateur

et ajouter sa réponse à la base de faits

FIN DU TANT QUE

FIN

Cours d'intelligence artificielle

26

Conclusion sur l'inférence

- La *possibilité* de concevoir des systèmes d'inférence de connaissances repose sur une *hypothèse psychologique* :
 - La **structuration de nos aptitudes en règles symboliques parfaitement identifiables**.
- Mais cette hypothèse est de moins en moins vraie et l'on envisage maintenant des modèles de savoir qui n'y ont plus recours (modèles connexionistes, systèmes adaptatifs, etc.).
 - On arrive maintenant à représenter la connaissance sous d'**autres formes** que les règles.

Systèmes d'inférence

- Parmi les exemples de systèmes utilisant les mécanismes d'inférences, on retrouve :
 - Les **systèmes experts**
 - Les **systèmes à base de connaissances**
- De plus en plus, les techniques utilisent à la fois des **systèmes experts** et **d'autres techniques** comme les réseaux de neurones basés sur des hypothèses plus adaptatives que symboliques (systèmes hybrides).

Les systèmes experts

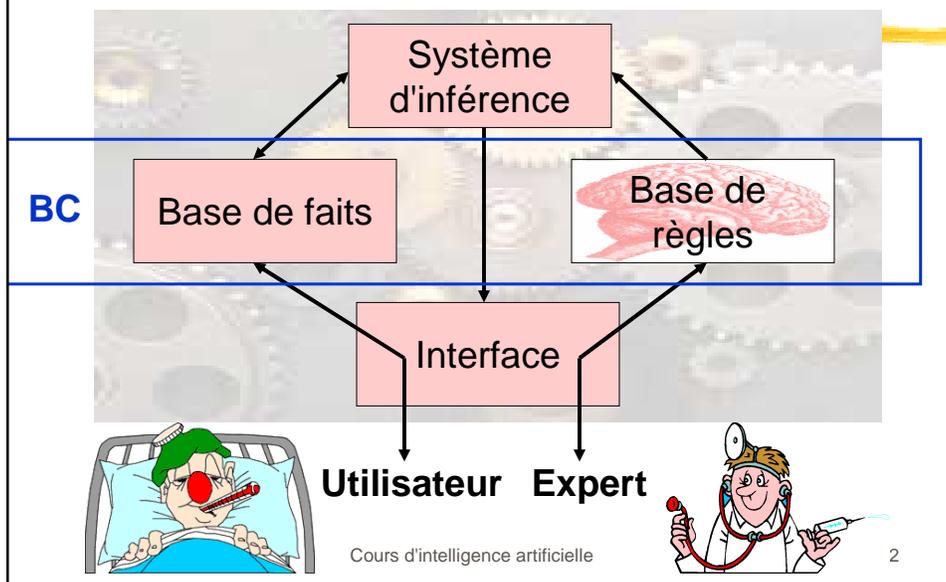
Introduction

- Un **système expert** est un logiciel qui reproduit le comportement d'un expert humain accomplissant une tâche intellectuelle dans un domaine précis.
 - Les systèmes experts sont généralement conçus pour résoudre des problèmes de **classification** ou de **décision** (diagnostic médical, prescription thérapeutique, régulation d'échanges boursiers, ...).
 - Les systèmes experts sont des outils de *l'intelligence artificielle*, c'est-à-dire qu'on ne les utilise que lorsqu'aucune méthode algorithmique exacte n'est disponible ou praticable.
 - Un système expert n'est concevable que pour les domaines dans lesquels il existe des **experts humains**.
 - Un **expert** est quelqu'un qui connaît un domaine et qui est plus ou moins capable de transmettre ce qu'il sait : ce n'est par exemple pas le cas d'un enfant par rapport à sa langue maternelle.

Sous-parties d'un système expert

- Un système expert est composé de deux parties indépendantes :
 - une **base de connaissances** elle-même composée
 - d'une **base de règles** qui modélise la connaissance du domaine considéré
 - d'une **base de faits** qui contient les informations concernant le cas que l'on est en train de traiter
 - un **moteur d'inférences** capable de raisonner à partir des informations contenues dans la base de connaissance, de faire des déductions, etc.

Structure d'un système expert



Rôle du cogniticien

- Rôle du **cogniticien** (*celui qui organise la connaissance*)
 - *soutirer* (*prendre*) leurs connaissances aux experts du domaine ;
 - *traduire* ces connaissances dans un formalisme se prêtant à un traitement automatique, c'est-à-dire en *règles*.
- Ces deux tâches sont aussi **délicates** l'une que l'autre :
 - Souvent, un expert est *inconscient* de la majeure partie de son savoir.
 - Et s'il arrive à en exprimer une partie, c'est souvent sous une forme qui est *difficile à formaliser* (traduire pour l'ordinateur).
 - L'extraction de connaissances peut avoir un effet *perturbant* sur l'expert.
- Exemple : si on demande à un maître aux échecs de réfléchir à sa manière de jouer, on observera une baisse de ses performances dans les jours ou les semaines qui suivent cet effort d'introspection.

Cours d'intelligence artificielle

33

Conception pratique

- Dans la réalité, les choses se passent de manière un peu moins idéale et il est souvent nécessaire d'*organiser* la base de connaissances, de réfléchir sur les stratégies d'utilisation des règles, etc.
- Le système expert est souvent complété par des interfaces plus ou moins riches permettant un dialogue avec les utilisateurs, l'idéal étant une interface en langage naturel.

Cours d'intelligence artificielle

34

Un exemple célèbre : MYCIN (1)

- Dans les années 1970, une équipe de Stanford University a fait l'hypothèse que l'intelligence repose sur le stockage des grandes quantités de connaissance.
- Ils ont cherché des techniques de "représentation de la connaissance". Ils ont trouvé utile de représenter la connaissance sous forme de règles.
- En 1973 ils ont cherché un domaine pour faire une étude. Ils ont retenu le domaine de la médecine en "thérapie antibiotique".

Un exemple célèbre : MYCIN (2)

- Le résultat a été le système MYCIN :
 - Conçu entre 1973 et 1978.
 - E-MYCIN (Essential Mycin) - généralisation
 - Domaine : anti-microbien ou antibiotique
 - Il existe un grand choix de médicaments anti-microbiens ainsi qu'un grand nombre de microbes.
 - Chaque antibiotique agit différemment sur chaque microbe.
 - À cause de cette grande variété, seuls certains médecins spécialisés connaissent bien ce domaine.
- La version de base en 1974 contenait environ 200 règles.
- Elle a été complétée entre 1975 et 1978 par 300 règles supplémentaires concernant principalement les méningites.

Un exemple célèbre : MYCIN (3)

- Buts à atteindre :
 - Facile à utiliser
 - Fiable
 - Manipule un grand nombre de connaissances
 - Utilise des renseignements inexacts ou incomplets
 - Explique et justifie ses conseils

- MYCIN est un "programme de consultation" :
 - Il donne des avis aux médecins concernant les thérapies anti-microbiennes.

Un exemple célèbre : MYCIN (4)

- Le premier "vrai" système expert
 - Programmation heuristique
 - Connaissance experte du domaine
 - Explication interactive
 - Connaissance et jugements

- Le système :
 - 1) Demande des informations sur le cas.
 - 2) Applique ses connaissances.
 - 3) Donne son jugement et conseille.
 - 4) Répond aux questions sur son raisonnement.

Un exemple célèbre : MYCIN (5)

- Ce système expert a été abondamment étudié et commenté en raison de l'importance du domaine concerné et surtout, de la grande qualité de ses diagnostics et propositions thérapeutiques :
 - *"Même en se limitant à la version de base existant en 1974, les résultats sont satisfaisants.*
- Ainsi, en 1974, **15 cas** représentatifs d'infections bactériennes furent soumis à **MYCIN** d'une part et à **5 experts** d'autre part :*
- Les 5 experts **approuvèrent** les décisions (recommandations thérapeutiques) de MYCIN dans **11 cas sur 15** (soit 55 accords pour 75 comparaisons).
 - Dans les **autres cas**, les 5 experts étaient en **désaccord entre eux.**"

Exemple d'utilisation (1)

- Ce logiciel était d'autant plus séduisant qu'une interface en langage *"quasi-naturel"* permettait une communication confortable (et un peu bluffante) avec les utilisateurs.
- Voici un exemple de conversation entre MYCIN et un médecin :
 - **1) Please enter information about the patient.**
 - **Name : Sally**
 - **Age : 42 years**
 - **Sex : Female**
 - **Race : Caucasian**
 - **2) Are there any positive cultures obtained from SALLY? NO**
 - **3) Are there any pending cultures of SALLY? YES**
 - ...
 - **13) Has SALLY recently has symptoms of persistent headache or other abnormal neurologic symptoms (dizziness, lethargy, etc)? YES**
 - **14) Has SALLY recently had objective evidence of abnormal neurologic signs (nuchal rigidity, coma, seizures, etc.) documented by physician observation or examination? YES**
 - ...

Exemple d'utilisation (2)

- 38) *Is SALLY a burn patient? Why ?*
 - [i.e. *WHY is it important to determine whether SALLY has been seriously burned?*]
 - [4.0] *This will aid in determining the organisms (other than those seen on cultures or smears) which might be causing the infection.*
 - *It has already been established that*
 - [4.1] *the infection which requires therapy is meningitis,*
 - [4.2] *organisms were not seen on the stain of the pending csf culture (CULTURE-1),*
 - [4.3] *the type of the infection may be bacterial*
 - *Therefore, if*
 - [4.4] *SALLY has been seriously burned*
 - *then*
 - *there is suggestive evidence that Pseudomonas-aeruginosa is one of the organisms (other than those seen on cultures or smears) which might be causing the infection.*

Exemple d'utilisation (3)

- [back to question 38 ...] *How 4.3 ?*
 - [i.e. *HOW was it established that the type of the infection may be bacterial?*]
 - *The following rules concluded about: the likelihood that the type of the infection may be bacterial*

[4.5]	RULE500	(0.4)	
[4.6]	RULE501		(0.17)
[4.7]	RULE502	(0.1)	
[4.8]	RULE503	(0.42)	
[4.9]	RULE504	(0.28)	
 - *Thus, it has been established that the type of the infection may be bacterial.*
- ...
- *My therapy recommendations will be designed to treat for organisms that either are very likely or, although less likely, would have a significant effect on therapy selection if they were present. It is important to cover for the following probably infection(s) and associated organism(s):*
 - **INFECTION-1 is MENINGITIS**
 - + MYCOBACTERIUM-TB [from clinical evidence only]
 - + COCCIDIOIDES [from clinical evidence only]
 - + CRYPTOCOCCUS [from clinical evidence only]