

Intelligence Artificielle : plan

- 1- Introduction
- 2- La résolution de problèmes : recherche dans les graphes
- 3- Cas des jeux contre adversaire(s)
- 4- Apprentissage de fonctions d'évaluation
- 5- **Le raisonnement** (et les formalismes logiques)
- 6- Représentation structurée des connaissances
- 7- Apprentissage

5.1- Des questions

L'IA nécessite l'utilisation de grandes quantités de connaissances

➤ Comment représenter :

- des **définitions** : « Un éléphant est un mammifère gris à quatre pattes et une trompe »
- des **catégories** : « Les informaticiens »
- des **assertions** : « Le dernier roi de France s'appelait Louis-Philippe »
- des **exceptions** : « Il existe des élèves qui vont en cours »
- des **défauts (plausibilité)** : « la plupart des informaticiens sont des hommes »
- le **temps** : « Tant qu'il y aura de la neige, je ne retourne pas à l'INAPG » « Sur ces entrefaites, il arriva »
- les **quantificateurs** \forall et \exists : « la nuit tous les chats sont gris »
- les **possibilités**
- les **certitudes, les croyances**
- ... ?

5- Le raisonnement : plan

1. Enjeu et généralités
2. Le cas des formalismes logiques
 - Représentation
 - Inférences
3. La logique des propositions
4. La logique des prédicats
5. Extensions de la logique
 - Logiques non monotones
 - Calcul des situations
 - Logiques temporelles

5.1- Des questions

➤ Comment :

- **retrouver une connaissance**
 - **se rendre compte des co-références et les traiter** (les représenter par une seule entité ou par plusieurs ?) :
« Le dernier roi de France » & « Louis-Philippe »
 - **déduire des connaissances**
 - **ajouter des connaissances** (en tenant compte de la non-monotonie, du maintien de la cohérence, ...)
- **Comment le comportement** d'une base de connaissances *varie* avec la quantité et le type de connaissances disponibles ?
 - Existe-t-il des limites ?

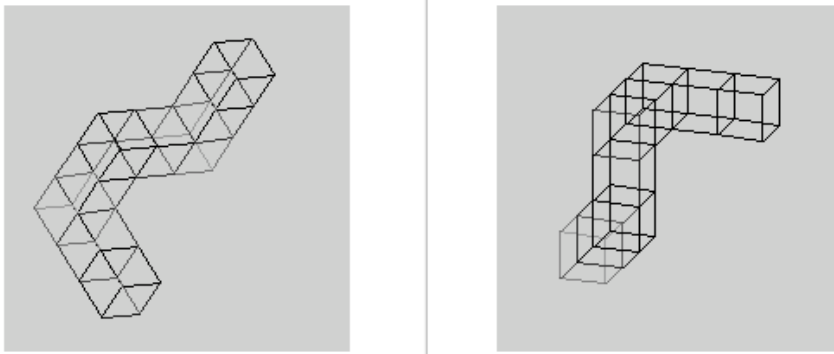
5.1- Des questions

- *Jacques est marié soit à Françoise, soit à Nicole*
Nicole n'est mariée à personne
⇒ Jacques est marié à Françoise
- *Jean observe Isabelle et Isabelle observe Georges*
Jean est marié et Georges ne l'est pas
⇒ Une personne mariée observe une personne non mariée
- **Quels types d'informations peuvent être extraites de quelles formes d'assertions d'une manière efficace et fiable ?**

5.1 Une représentation analogique

- **Exemple des formes de Shepard**

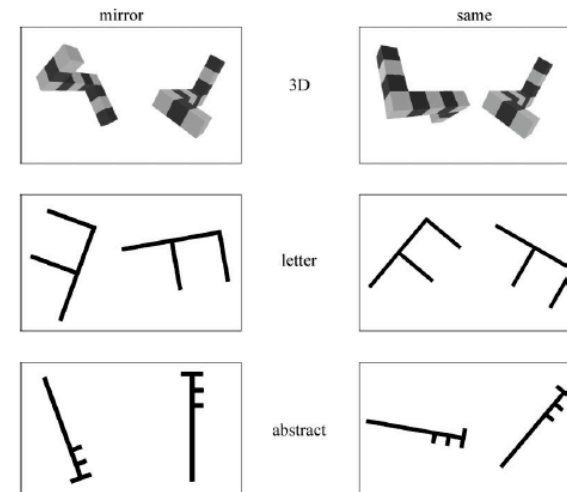
<http://www.ulb.ac.be/psychøfr/docs/museum/Experiments/Shepard/Shepard.html>



5.1 Un langage de la pensée ?

- **Hypothèse des sciences cognitives orthodoxes :**
 - **La cognition** peut être considérée comme un calcul réalisant la **création**, la **transformation** et la **propagation de représentations** à travers des moyens de représentation.
 - **La résolution de problèmes** signifie ni plus ni moins **trouver une représentation** qui en rende la solution transparente.

5.1 Une représentation analogique



5.1 Exemple : la navigation

[Hutchins (1995) : "Cognition in the wild". MIT Press, 1995]

- Etant donné un point de départ et une destination :
 - comment trouver comment y aller (quelle direction prendre à chaque instant) ?
 - Quelle distance minimale entre ces points ?

➔ Les moyens de calcul (et les représentations) sont très variés et très dépendants de la culture

5.1 Exemple : la navigation

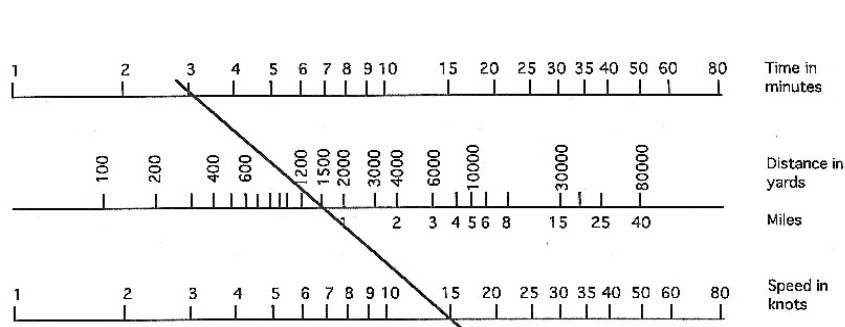


Figure 3.3 A three-scale nomogram.

5.1 Exemple : la navigation

- Supposons qu'il se passe 3mn entre deux mesures et qu'elles donnent une distance parcourue de 1500 yards.

Quelle est la vitesse du bateau ?

- Soient 4 contextes (ressources de représentation et de calcul) :
 - 1- Papier et crayon, connaissance de l'algèbre, connaissance de l'arithmétique, connaissance qu'il y a 2000 yards dans un mille nautique et 60mn dans une heure, connaissance de la relation $distance = vitesse \times durée$
 - 2- Même ressources sauf calculatrice au lieu de papier et crayon
 - 3- Règle à calcul nautique (cf. transparent suivant) + la connaissance requise pour l'utiliser
 - 4- Pas de matériel mais connaissance de la règle des 3mn

5.1 Exemple : la navigation

- Contexte 1

$$d = v \times t \Rightarrow v = \frac{d}{t} \quad (\text{K algèbre})$$

- $d = 1500 \text{ yards} = 1500/2000 \text{ mille}$ (K sur yards et mille et arithmétique)
- $t = 3\text{mn} = 3/60 \text{ heure}$

➔ $v = 0.75 / 0.05 = 15 \text{ milles/h}$

Rqs :

- les opérations peuvent être effectuées dans des ordres différents
- les opérations doivent être planifiées

5.1 Exemple : la navigation

- **Contexte 2**

- Opérations similaires, mais sans l'aide de papier pour mémoriser les résultats intermédiaires
- La difficulté réside dans le choix de l'ordre des opérations pour simplifier les calculs et la mémorisation.
L'utilisation d'une calculatrice ne facilite pas ce choix.

5.1 Exemple : la navigation

- **Contexte 4**

- **3mn = 1/20 heure**
- **100 yards = 1/20 mille**
- ➔ **"Règle des 3mn" :**
Il suffit d'enlever les 2 derniers chiffres de la distance lue (1500 yards) pour avoir la vitesse : 15 nœuds
- **Rqs :**
 - La réponse est "évidente"
 - Un calcul complexe (du point de vue conceptuel) est réalisé par une opération élémentaire (mais qui demande qu'on fasse le point toutes les 3mn)

5.1 Exemple : la navigation

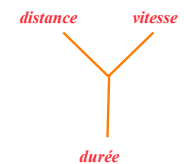
- **Contexte 3**

- **Mettre une marque sur la règle graduée en temps (mn)**
- **Mettre une marque sur la règle graduée en distance (yards)**
- **Tirer un trait entre les deux**
- ➔ **Lire le résultat sur la règle graduée en vitesse (nœuds)**
- **Rqs :**
 - Pas de problème de conversion d'unités
 - Les opérations (divisions, ...) sont "inscrites" dans la représentation (logarithmique)
 - Aucune connaissance de l'algèbre nécessaire
 - Les relations incorrectes (ou erreurs) sont "éliminées" automatiquement (on ne peut les réaliser)

5.1 Les niveaux de représentation de Marr (1982)

- **Niveau "computationnel"**

- **Spécifie ce que fait le système et pourquoi il le fait**
 - E.g. Contrainte entre distance parcourue, durée et vitesse



- **Niveau des "représentations"**

- **Spécifie le choix de représentation des entrées et des sorties et des algorithmes de transformation entre les deux**

- **Niveau de l'implémentation**

- **Concerne le détail de l'implémentation physique des algorithmes et des représentations**

5.1 Morale

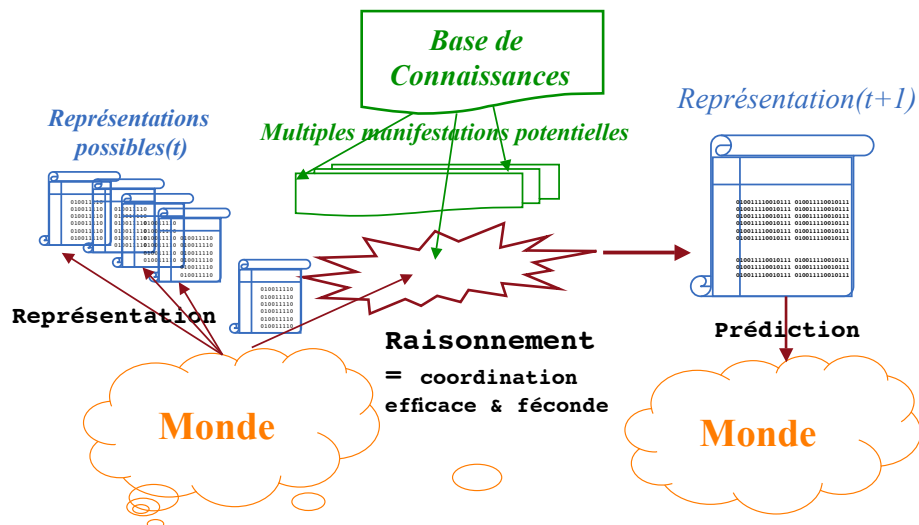
Les quatre contextes de calcul correspondent au même niveau computationnel mais à des choix de niveau de représentation différents.

➔ **Une représentation donne le moyen de trouver la solution**

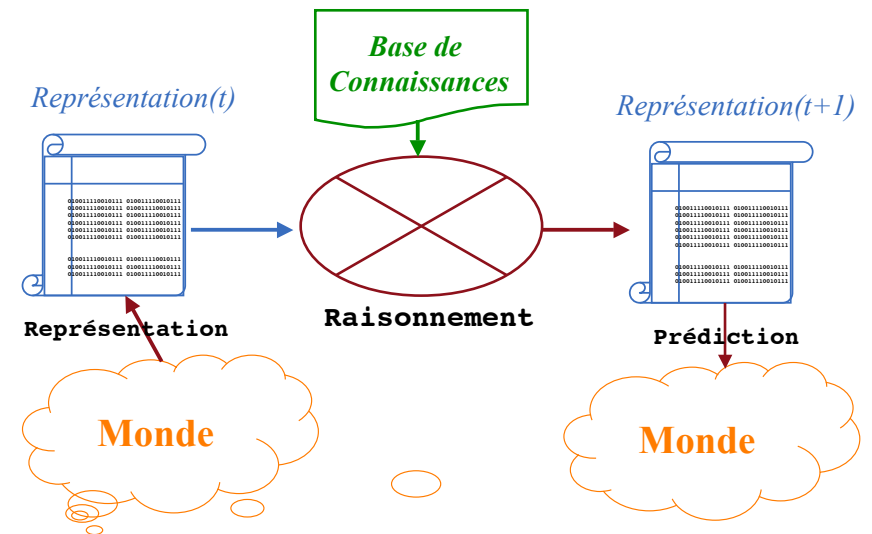
• **Questions essentielles :**

- **Quelles sont les propriétés que vérifient les transformations**
 - D'états de représentations
 - De cadres de représentation

5.1 Représentation et raisonnement (2)



5.1 Représentation et raisonnement (1)

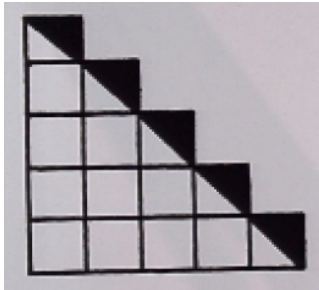


5.1 Point de vue sur le raisonnement

- **Comment "coordonner" des représentations pour en tirer des informations supplémentaires ?**
- **Types de coordinations**
 - **Déduction**
 - **Abduction**
 - **Induction**
 - **Analogie**
 - **Blending**
 - **Effet Tunnel**
 - **... (recherches)**

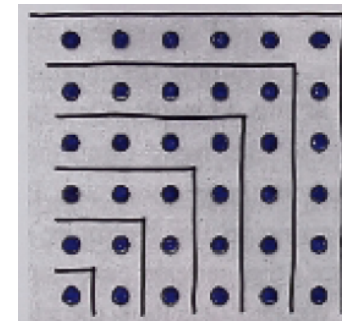
Raisonnement graphique

$$1 + 2 + 3 + \dots + n = \frac{n^2}{2} + \frac{n}{2}$$



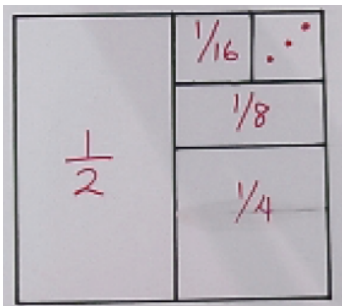
Raisonnement graphique

$$1 + 3 + 5 + \dots + (2n - 1) = n^2$$



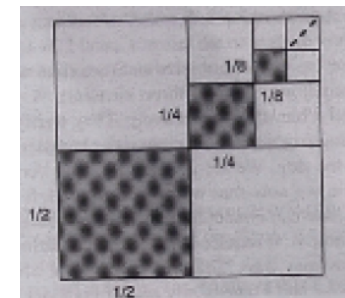
Raisonnement graphique

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2^n} = \frac{1}{2} + \frac{1}{4} + \frac{1}{8} + \frac{1}{16} + \dots = 1$$

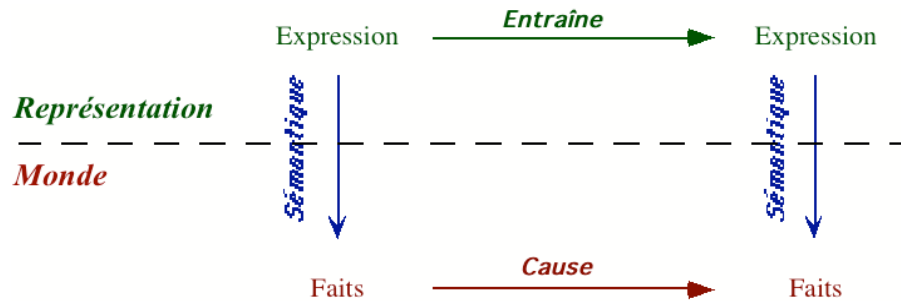


Raisonnement graphique

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{4^n} = \frac{1}{3}$$



5.1 Représenter ...



5.1 Représentation des connaissances vs. base de données

En général ce qui est **représenté implicitement** est bien plus vaste que ce qui est **représenté explicitement**

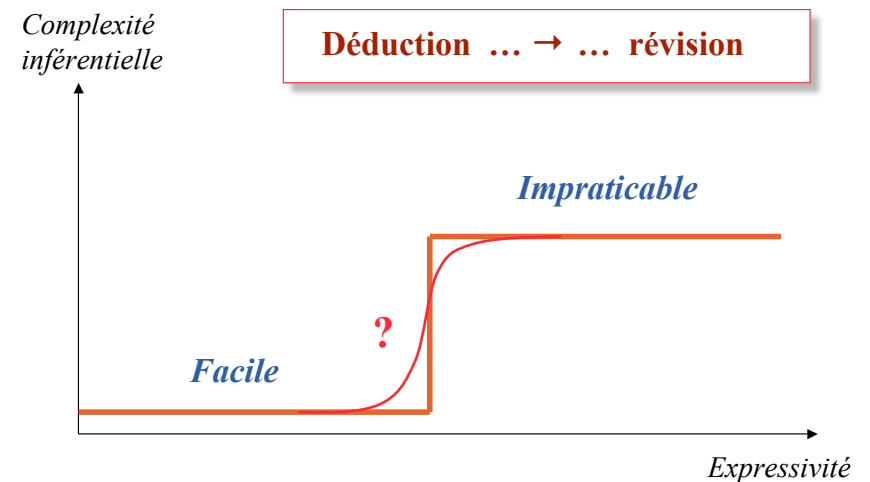
→ La représentation des connaissances et la capacité de raisonnement sont donc deux faces de la même pièce

→ Les deux aspects doivent être pris en compte dans la conception ou dans le choix d'un système de représentation des connaissances

5.1 L'aspect inférentiel

- Comment on dérive l'information qui est seulement implicite ?
- Comment on contrôle jusqu'où on veut aller et les ressources computationnelles que l'on est prêt à y investir ?
- En général se pose un problème de complexité calculatoire et même souvent de NP-complétude du raisonnement

5.1 Un compromis nécessaire



5.1 Expression des connaissances : facilité des calculs

1. Olivier a bu 3 verres de gin

Charles a bu 4 verres de gin

2. Olivier et Charles ont bu ensemble 7 verres de gin

Charles a bu un verre de plus qu'Olivier

Expression *complète + immédiate* (*vivid*)

⇒ **calculs simples et rapides**

5.1 Des solutions

- **Favorisant la notion de calcul de la vérité et la généralité des inférences**
 - **Les logiques**
 - ordre 0 : propositionnelle
 - ordre 1 : des prédicats
 - ordre supérieur : quantification portant sur les prédicats
 - **Systèmes à base de règles**
 - **Approches probabilistes**
- **Favorisant l'expression des connaissances (ontologie)**
 - **Les langages de schémas et de frames**
- **Systèmes hybrides** : cherchant un bon compromis entre puissance et efficacité

5.1 Expression des connaissances : facilité des calculs

Selon Brachman & Levesque (in the 80s)

- **Les structures d'une représentation des connaissances doivent avoir un double statut**
 1. Il doit être possible de les interpréter comme des propositions sur le monde. Il faut donc que *la représentation supporte une théorie de la vérité*.
 2. Elles doivent avoir un *rôle causal dans le raisonnement* et donc dans le comportement du système
- **Un système à base de connaissance a pour responsabilité de :**
 - *sélectionner une représentation des connaissances* adaptée pour le domaine étudié
 - *sélectionner des mécanismes de raisonnement* appropriés à la fois pour chercher des réponses et pour assimiler de nouvelles informations

5.2 La représentation dans les formalismes logiques

- **Syntaxe :**
 - Décrit les configurations possibles des expressions autorisées
- **Sémantique :**
 - Détermine les faits du monde auxquelles réfèrent les expressions syntaxiques
- **Implication ("entraîne"):**
 - Au niveau syntaxique : transformations correspondant à des conséquences (causalité) entre faits dans le monde
 - Une procédure d'inférence ne produisant que des implications correspondant à des relations de causalité dans le monde "*conserve la vérité*" (truth preserving) ou est dite *correcte*
 - Une *preuve* est une séquence d'implications ou d'inférences saines
 - Un mécanisme de preuve est *complet* si il permet de trouver une preuve pour toutes les expressions correctes (impliquées par l'expression courante)

5.2 Une logique ...

... consiste en :

1. Un système formel permettant de décrire les états du monde

- La *syntaxe* du langage (décrivant comment construire des expressions)
- La *sémantique* du langage (décrivant comment les expressions réfèrent aux états du monde)

2. Une théorie de preuve

(Ensemble de *règles de déduction* c.a.d. calculant des implications)

5.2.2 La logique des propositions (ordre 0)

• Conséquence logique ("entailment")

- Une expression α est conséquence logique d'une base de connaissance BC si les modèles de BC sont tous modèles de α
- Il est possible de déterminer la valeur de vérité d'une implication en établissant sa table de vérité (*implication logique*, notée \models)

• Règles d'inférence

- Il est possible de montrer que certaines formes régulières d'inférence sont correctes. Ces formes peuvent alors être transformées en règles d'inférence (procédures de calcul évitant d'établir des tables de vérité)
- Notations :

$$a \vdash b \quad \text{ou} \quad \frac{\alpha}{\beta}$$

5.2.2 La logique des propositions (ordre 0)

• Syntaxe

- Constantes logiques : vrai, faux
- Symboles de proposition (e.g. P, Q)
- Connecteurs logiques $\wedge, \vee, \Leftrightarrow, \Rightarrow, \neg$ et les ().

Exemple d'expression : $((\neg P) \vee (Q \vee R)) \Rightarrow S$

• Sémantique

- Les symboles de proposition peuvent référer à n'importe quel fait
(ex : P = Paris est la capitale de la France)
- Les connecteurs peuvent être considérés comme des fonctions booléennes
- Notion de table de vérité

• Modèle

Tout monde dans lequel une expression est vraie sous une certaine interprétation est appelé *modèle* de cette expression sous cette interprétation

5.2.2 La logique des propositions : règles d'inférence

• Modus ponens

$$\frac{\alpha \Rightarrow \beta, \alpha}{\beta}$$

• ET-élimination

$$\frac{\alpha_1 \wedge \alpha_2 \wedge \dots \wedge \alpha_n}{\alpha_i}$$

• ET-introduction

$$\frac{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n}{\alpha_1 \wedge \alpha_2 \wedge \dots \wedge \alpha_n}$$

• OU-introduction

$$\frac{\alpha_i}{\alpha_1 \vee \alpha_2 \vee \dots \vee \alpha_n}$$

• Élimination double négation

$$\frac{\neg\neg\alpha}{\alpha}$$

• Résolution unitaire

$$\frac{\alpha \vee \beta, \neg\beta}{\alpha}$$

• Résolution

$$\frac{\alpha \vee \beta, \neg\beta \vee \gamma}{\alpha \vee \gamma}$$

5.2.2 Un agent basé sur une connaissance en logique

- Les **agents intelligents** ont besoin de connaissances sur le monde pour agir efficacement
- La **connaissance** est exprimée grâce à un langage de représentation sous forme de phrases dans une base de connaissances
- Un agent basé sur la connaissance est composé d'une **BC** et d'un **mécanisme d'inférence**
- Un **langage de représentation** est défini par sa syntaxe et sa sémantique
- Le **mécanisme d'inférence** permet de calculer de nouvelles expressions à partir d'expressions existantes
 - Il est dit **correct** si il dérive des expressions vraies à partir de prémisses vraies
 - Il est dit **complet** si il dérive toutes les expressions vraies à partir d'un ens. de prémisses
- La **logique des propositions** décrit des faits simples sur le monde. Elle a une syntaxe et une sémantique simples
- La **logique des propositions** est rapidement **insuffisante** pour la plupart des applications

5.3 La logique des prédicats (ordre 1) : motivation

Connaissances incomplètes

\neg étudiant(jean)

parent(lucie, pierre) \vee parent(lucie, charles)

$\exists X$ cousin(corinne,X) \wedge masculin(X)

$\forall X$ ami(georges,X) $\Rightarrow \exists Y$ enfant(X,Y)

- La puissance de la logique du premier ordre vient de ce qu'on peut laisser implicite
 - ➔ NP-complet
- **Idée** : *réduire l'incomplétude de la représentation en espérant gagner sur la puissance de raisonnement*

5.3 La logique des prédicats (ordre 1) : motivation

Limitations de la logique des propositions

- **ON-B-C** & **bouger BLOC-B** : comment faire le lien entre les deux B (même bloc) ?
(**R-23** & **Q-204** : auraient le même effet en logique des propositions)

➔ **Il n'est pas possible d'exprimer des relations entre symboles**

(car les atomes sont des chaînes de caractères sans structure interne)

5.3 Illustration

- 1- Marcus était un homme
- 2- Marcus était un Pompéien
- 3- Tous les pompéiens étaient romains
- 4- César était un homme d'état
- 5- Tous les romains étaient soit loyaux à César ou le haïssaient
- 6- Tout le monde est loyal à quelqu'un
- 7- Les gens n'assassinent que les hommes d'état qu'ils haïssent
- 8- Marcus tenta d'assassiner César

5.3 Représentation en logique des prédicats

- 1- homme(Marcus)
- 2- pompéien(Marcus)
- 3- $\forall x$ pompéien(x) \rightarrow romain(x)
- 4- homme-d-état(César)
- 5- $\forall x$ romain(x) \rightarrow loyal(x ,César) \vee hait(x ,César)
ou : $\forall x$ romain(x) \rightarrow (loyal(x ,César) \vee hait(x ,César))
 $\wedge \neg$ (loyal(x ,César) \wedge hait(x ,César))
- 6- $\forall x \exists y$ loyal(x , y)
- 7- $\forall x \forall y$ personne(x) \wedge homme-d-état(y) \wedge tente-assassiner(x , y) $\rightarrow \neg$ loyal(x , y)
- 8- tente-assassiner(Marcus,César)

\neg loyal (Marcus,César) ?

5.3.1 Logique des prédicats : représentation

{ Jean est un homme
 Médor est un chien
 Jean donne un sucre à Médor

humain(jean)
 chien(médor)
 donner(jean, médor, sucre)

ou

sorte-de(humain, jean)
 sorte-de(chien, médor)
 donner(jean, médor, sucre)

ou

égal(nature(jean), humain)
 égal(nature(médor), chien)
 donner(jean, médor, sucre)

5.3 Remarques

- La plupart des phrases sont ambiguës. **Choisir la "bonne" interprétation** peut être difficile.
- Le **choix de la représentation** est lui-même problématique. Il est important d'avoir une représentation simple, mais cela peut interdire certains types de raisonnements. La représentation dépend beaucoup du but poursuivi.
- Même dans des situations simples, **il est facile d'omettre la représentation d'informations nécessaires** parce qu'elles paraissent "aller de soi".

5.3.1 La logique des prédicats (ordre 1)

- **Syntaxe**
 - Termes : constantes, variables ou fonctions
 - Formules atomiques : prédicats
 - Formules bien formées : formules atomiques + \neg A et A \cup B (A et B : formules bien formées)
- **Quantification** : universelle (\forall), existentielle (\exists)
- **Sémantique** : constantes de l'univers \mathcal{D} (domaine) + interprétation des fonctions et des prédicats (pour chaque prédicat n -aire : une relation sur \mathcal{D}^n et pour chaque fonction n -aire, une fonction de \mathcal{D}^n dans \mathcal{D})
- **Théorie du domaine** : des axiomes ou des théorèmes
 - Exemple : père(X,Y) & mère(Y,Z) \Rightarrow grand-père(X,Z)
- **Règles d'inférence**

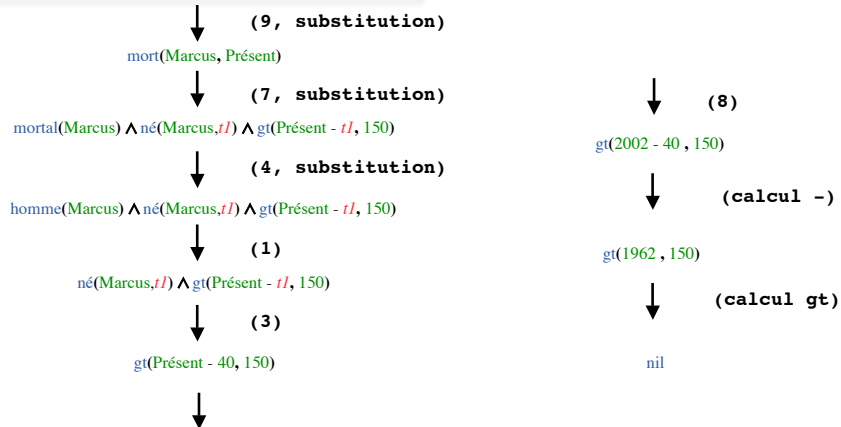
5.3.1 Autre exemple

- 1- homme(Marcus)
- 2- pompéien(Marcus)
- 3- né(Marcus,40)
- 4- $\forall x \text{ homme}(x) \rightarrow \text{mortel}(x)$
- 5- $\forall x \text{ pompéien}(x) \rightarrow \text{mort}(x,79)$
- 6- éruption (Vésuve,79)
- 7- $\forall x \forall t1 \forall t2 \text{ mortel}(x) \wedge \text{né}(x, t1) \wedge \text{gt}(t2-t1, 150) \rightarrow \text{mort}(x,t2)$
- 8- Présent = 2002
- 9- $\forall x \forall t \text{ vivant}(x, t) \rightarrow \neg \text{mort}(x, t)$
 $\forall x \forall t \neg \text{mort}(x, t) \rightarrow \text{vivant}(x, t)$
- 10- $\forall x \forall t1 \forall t2 \text{ mort}(x, t1) \wedge \text{gt}(t2, t1) \rightarrow \text{mort}(x,t2)$

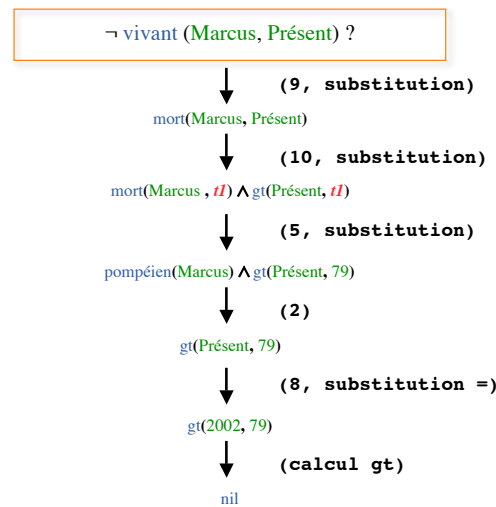
$\neg \text{vivant}(\text{Marcus}, \text{Présent}) ?$

5.3.2 Autre preuve

$\neg \text{vivant}(\text{Marcus}, \text{Présent}) ?$



5.3.2 Autre exemple



5.3.2 Leçons

- **Les preuves impliquent de très nombreuses petites étapes (inférences):** *appariements, substitutions, application du modus ponens, ...*
 - **Il serait intéressant** (pour une plus grande efficacité et une communication plus aisée avec les utilisateurs) **d'utiliser des étapes plus importantes (méta-opérateurs)**. Cela est encore du domaine de la recherche (voir "apprentissage à partir d'explications" : EBL).
 - **Il existe plusieurs chemins de preuve** (nombreux choix à chaque étape) même pour les problèmes simples.
 - Cela pose des **problèmes de contrôle du raisonnement**.
 - Peut-on avoir un **mécanisme de raisonnement systématique, efficace et complet** ?
- ➔ **La procédure de *preuve par résolution*** (Robinson, 1965) **a constitué un progrès considérable**

5.3.3 Preuve par résolution : préliminaires

- Une seule opération remplace tous les types d'inférences vus
 - Cela est rendu possible par l'utilisation d'une représentation standard très pratique : *les clauses*
- La procédure de résolution opère par *réfutation* : en essayant de montrer que la négation du but est incohérente avec la base de connaissances

5.3.3 Résolution : présentation par clauses bien formées (wff)

- Représentation "plate" et sans quantificateurs

$$\forall x [\text{romain}(x) \wedge \text{connâit}(x, \text{Marcus})] \rightarrow [\text{hait}(x, \text{César}) \vee (\forall y (\exists z \text{hait}(y, z)) \rightarrow \text{pense-fou}(x, y))]$$

Tous les romains qui connaissent Marcus, soit haïssent César
ou bien pensent que quiconque hait quelqu'un est fou.

$$\neg \text{romain}(x) \vee \neg \text{connâit}(x, \text{Marcus}) \vee \text{hait}(x, \text{César}) \vee \neg \text{hait}(y, z) \vee \text{pense-fou}(x, y)$$

5.3.3 Le monde des clauses : rappels

- **Terme:** constantes, variables, fonctions
socrate, X, f(X,Y)
- **Atome:** $P(t_1, t_2, \dots, t_n)$ où t_i est un terme et P un Prédicat
Homme(x), R(socrate, platon, f(x, aristote))
- **Formule:** connecteurs $\wedge, \vee, \Rightarrow, \equiv, \neg$, quantificateurs \forall, \exists
 $\forall x [\text{Homme}(x) \Rightarrow \text{Mortel}(x)]$

$$\begin{aligned} \text{Clause: } L_1 \vee L_2 \vee \dots \vee L_n &= \{L_1, L_2, \dots, L_n\} \\ \neg \text{Homme}(x) \vee \text{Mortel}(x) &= \{\text{Homme}(x), \text{Mortel}(x)\} \end{aligned}$$

5.3.3 Résolution : conversion en clauses bien formées (wff)

1. Elimination des \rightarrow
2. Réduction de la portée des négations \neg
3. Renommage des variables : chaque quantificateur ne porte que sur une variable
4. Mise sous forme prenex : mettre tous les quantificateurs à gauche
5. Elimination des quantificateurs existentiels : skolemisation
6. Elimination des quantificateurs universels
7. Mise sous forme de conjonction de disjonctions (DNF)
8. Transformation de chaque disjonction (conjunct) en clause
9. Renommage des variables pour qu'elles n'apparaissent pas dans deux clauses différentes

5.3.3 Inférences en logique des prédicats

• Règles concernant les quantificateurs :

□ Élimination du quantificateur universel

Ex : $\forall x, \text{ aime}(x, \text{ ice-cream}) \Rightarrow \text{ aime}(\text{fred}, \text{ ice-cream}) \{x / \text{fred}\}$

□ Élimination du quantificateur existentiel

Ex : $\exists x, \text{ tuer}(x, \text{ john}) \Rightarrow \text{ tuer}(\text{oscar}, \text{ john})$

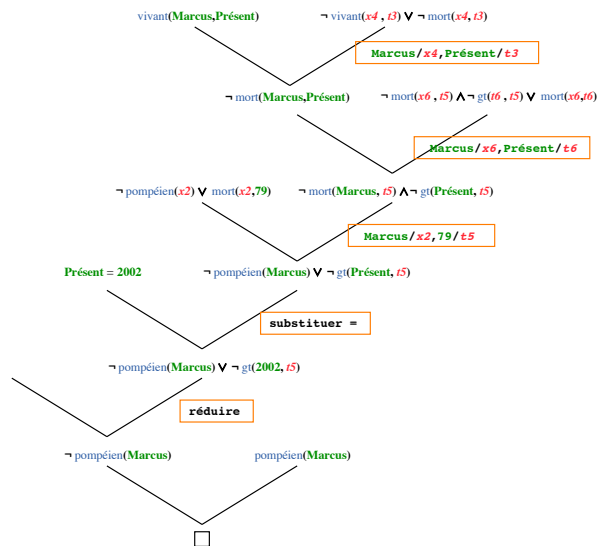
(du moment que oscar n'apparaît pas ailleurs dans la base de connaissances)

□ Introduction d'un quantificateur existentiel

Ex : $\text{ aime}(\text{jerry}, \text{ ice-cream}) \Rightarrow \exists x, \text{ aime}(x, \text{ ice-cream})$

5.3.3 Preuve par résolution : exemple

1. $\text{ homme}(\text{Marcus})$
2. $\text{ pompéien}(\text{Marcus})$
3. $\text{ né}(\text{Marcus}, 40)$
4. $\neg \text{ homme}(x) \vee \text{ mortel}(x)$
5. $\neg \text{ pompéien}(x) \vee \text{ mort}(x, 79)$
6. éruption (Vésuve, 79)
7. $\neg \text{ mortel}(x) \vee \neg \text{ né}(x, t) \vee \neg \text{ gt}(t - t_1, 150) \vee \text{ mort}(x, t_2)$
8. Présent = 2002
- 9a. $\neg \text{ vivant}(x, t) \vee \neg \text{ mort}(x, t)$
- 9b. $\text{ mort}(x, t) \vee \text{ vivant}(x, t)$
10. $\neg \text{ mort}(x, t) \wedge \neg \text{ gt}(t, t_1) \vee \text{ mort}(x, t_1)$



5.3.3 Le monde des clauses : rappels

- **Horn clause** : au plus un littéral positif
- **Definite program clause** : exactement un littéral positif
- **Definite program** : un ensemble de clauses définies
- **Program clause** : une clause de la forme:

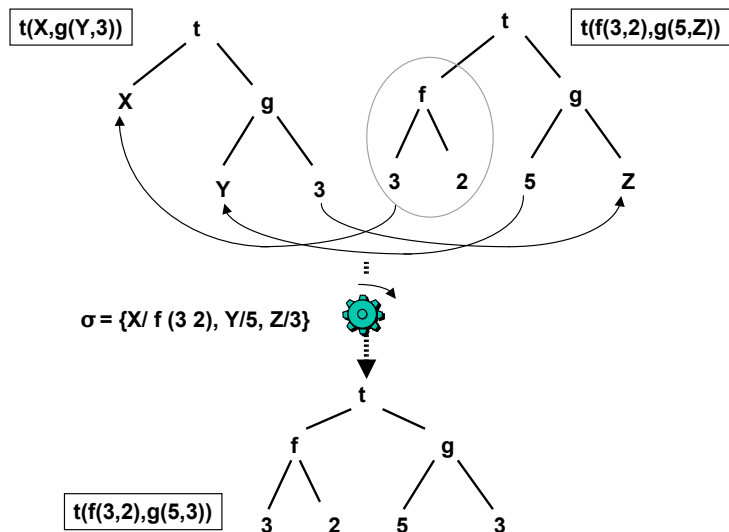
$$T \leftarrow L_1, L_2, \dots, L_n$$
 où T est un atome et L_i de la forme L ou not L
- **Datalog clause** : une clause sans symbole de fonction autre que d'arité 0 (Seulement des variables et constantes)
- **Constrained Clause** : variables du corps aussi dans la tête

5.3.3 La résolution

Le problème de la déduction: $\{C_1, \dots, C_n\} \models C ?$
 $\{\text{homme}(X), \text{mortel}(X)\} \cup \{\text{homme}(\text{socrate})\} \models \text{mortel}(\text{socrate}) ?$

- **Substitution/Instantiation:**
 $\text{ homme}(X)$ s'instancie en $\text{ homme}(a)$ par la substitution $\sigma = \{X/a\}$
- **Unification:**
 $\text{ homme}(\text{socrate})$ et $\text{ homme}(X)$ s'unifient en $\text{ homme}(\text{socrate})$
- **Résolution (Robinson, 1965)**
 $\{\text{homme}(\text{socrate})\} \cup \{\text{homme}(X), \text{mortel}(X)\} \models \text{mortel}(\text{socrate})$
 $\sigma = \{X/\text{socrate}\}$

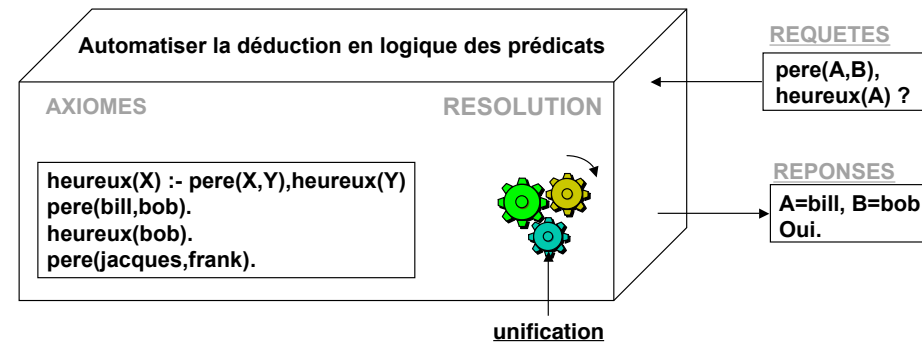
5.3.3 L'unification de termes



5.3.3 La programmation logique

Résolution efficace: clauses de Horn/ règles PROLOG

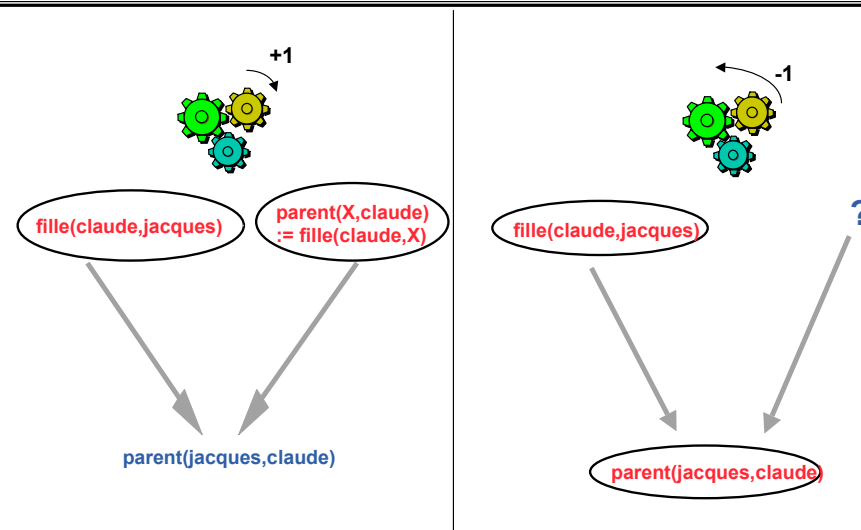
$$-\text{Homme}(x) \vee \text{Mortel}(x) \iff \text{Mortel}(x) \text{ :- Homme}(x)$$



5.3.3 Remarque

- Les procédures de preuve en logique des prédicats ne peuvent être que semi-décidables :
 - elles **terminent en un temps fini** si **une preuve existe** à la requête
 - elles **peuvent ne pas terminer** si la **requête n'est pas prouvable**

5.3.4 Un exemple d'induction : inversion de la résolution



5.4 Systèmes à règles de production

- Formalisme des règles de production
- Règles d'inférence
 - Modus ponens
 - Chaînage avant
 - Chaînage arrière
 - Arbre de preuve
- Le cycle de base et le contrôle du raisonnement
- Cas de connaissances *incertaines, imprécises, hypothétiques*
- Applications
 - MYCIN, XCON, ...

5.4 Règles de production

Si conditions alors conséquence

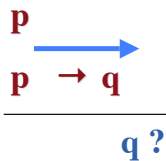
Exemples :

Si la température du réacteur dépasse 800°C
alors descendre les barres de contrôle

Si champignons à lames séparables *et* sporée rose
alors champignon du genre leucopaxillus

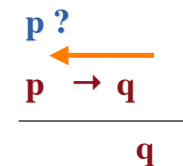
Si X est un chien *alors* X est un mammifère

5.4 Chaînage avant et chaînage arrière



Chaînage avant :

utilisé quand on cherche les conséquences de l'ajout de nouveaux faits



Chaînage arrière :

utilisé quand on cherche à prouver un but

5.4 Systèmes à règles de production

R1 : Si A alors E
 R2 : Si B alors D
 R3 : Si H alors A
 R4 : Si E et G alors C
 R5 : Si E et K alors B
 R6 : Si D et E et K alors C
 R7 : Si G et K et F alors A

Chaînage avant :

H, K --R3--> H, K, A

--R1--> H, K, A, E

--R5--> H, K, A, E, B

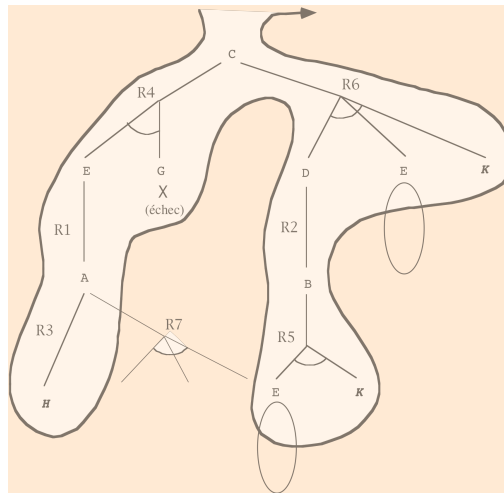
--R2--> H, K, A, E, B, D

--R6--> H, K, A, E, B, D, C
 (succès)

5.4 Systèmes à règles de production

- R1 : **Si** A **alors** E
- R2 : **Si** B **alors** D
- R3 : **Si** H **alors** A
- R4 : **Si** E et G **alors** C
- R5 : **Si** E et K **alors** B
- R6 : **Si** D et E et K **alors** C
- R7 : **Si** G et K et F **alors** A

Chaînage arrière :



5.4 Bilan sur les formalismes logiques (2)

• Les limites

- Surtout : l'**explosion combinatoire des inférences à envisager**
- Le **problème du cadre** ("frame problem")
 - Qu'est-ce qui reste vrai après une transition d'états ?
 - Qu'est-ce qui change indépendamment de l'agent ?
- Le **problème de la qualification**
 - Comment énumérer toutes les exceptions possibles ?
- Le problème de la **non-monotonie**
- Le problème du **maintien des mondes possibles**

5.4 Bilan sur les formalismes logiques (1)

- La logique contraint assez peu ce qui peut être exprimé
 - (Avantage : *donne de la liberté* ; Inconvénient : *il faut davantage contrôler*)
- Les inférences s'appuient sur des **informations locales**
 - + : *Efficace, Modularité de la Base de Connaissance*
 - - : *N'autorise pas certains types de raisonnement (ex : rais' incertain)*
- Propriété de **monotonie**
 - Si on augmente BC, on augmente ce qui peut en être dérivé
- La structure de contrôle ("**moteur d'inférence**") peut être isolée de la base de connaissance

5.5 Le besoin d'autres "logiques"

- La température du réacteur est élevée
- Les blondes ont souvent les yeux bleus
- En l'absence de raison de croire le contraire, on peut supposer que chaque adulte que l'on rencontre sait lire
- Il est mieux d'avoir plus de pièces que l'adversaire aux échecs
- Je sais que John pense que les Australiens vont gagner, mais je pense que c'est le XV de France qui l'emportera

5.5 Le besoin d'autres "logiques"

- La température du réacteur est élevée
 - ↳ **Logique floue**
- Les blondes ont souvent les yeux bleus
 - ↳ **Raisonnement incertain** (e.g. Raisonnement bayésien)
- En l'absence de raison de croire le contraire, on peut supposer que chaque adulte que l'on rencontre sait lire
 - ↳ **Logique des défauts**
- Il est mieux d'avoir plus de pièces que l'adversaire aux échecs
 - ↳ **Connaissance heuristique**
- Je sais que John pense que les Australiens vont gagner, mais je crois que c'est le XV de France qui l'emportera
 - ↳ **Maintenance de croyances**

5.5-2 Extensions : le raisonnement non monotone

Informations :

1. Le vol Paris-Londres décolle à 7h
2. Le vol Paris-Londres dure une heure
3. En général, les avions sont à l'heure

Interprétation de **En général** $p(X)$:

Pour tout X_0 qui est un X , on peut légitimement supposer que $p(X_0)$ est vrai, **sauf** :

- Si l'on sait déjà que $p(X_0)$ est faux
- Ou si l'on peut déduire de nos connaissances que $p(X_0)$ est faux
- Ou si le fait que $p(X_0)$ soit vrai n'introduit pas de contradiction
- Ou si les connaissances du système ne permettent pas de déduire $\neg p(X_0)$
- On déduit alors :
 - l'avion de Paris arrivera à l'heure (8h)

5.5-1 Extensions : les logiques modales

5.5-2 Extensions : le raisonnement non monotone

Mais si on ajoute :

4. Les contrôleurs aériens font grève entre 6h et 8h
5. Les grèves produisent des retards

La déduction est impossible

La **monotonie** :

si $A \diamond B$ alors $\text{Th}(A) \diamond \text{Th}(B)$

n'est plus vérifiée

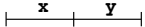

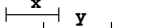

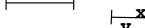
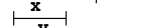

5.5-3 Extensions : le calcul des situations

5.5-4 Extensions : la logique temporelle

- Fait l'hypothèse que le monde est descriptible par un ensemble d'évènements mesurés sur des *instants* ou des *intervalles temporels*
- Fournit des mécanismes pour raisonner sur les évènements

Exemple : la **logique temporelle** (des intervalles) de **James Allen**

5.5-4 La logique temporelle de J. Allen

	Meets (x, y)	Met_by (y, x)
	Before (x, y)	After (y, x)
	Overlaps (x, y)	Overlapped_by (y, x)
	Starts (x, y)	Started_by (y, x)
	Ends (x, y)	Ended_by (y, x)
	During (x, y)	Contains (y, x)
	Equals (x, y)	Equals (y, x)

Relations de base (ex.) : $(\text{TM}_{x,y}) [\text{Meets}(x, y) \leftrightarrow (\text{end}(x) = \text{start}(y))]$

Exemple de fait :

$(\text{TM}_y) \{ \text{Occurs}(\text{eau}, y) \rightarrow (\exists x, z) [\text{Occurs}(\text{Tourn-ism}, x) \wedge \text{Occurs}(\text{Tourn-sm}, z) \wedge \text{Overlaps}(x, y) \wedge \text{Overlaps}(y, z)] \}$

(L'évènement de l'eau s'écoulant du robinet est précédé par tourner le robinet dans le sens inverse d'une montre et suivi par l'évènement tourner le robinet dans le sens d'une montre)

5.6 Les représentations hybrides

1- Essai de résoudre le compromis entre

- **expressivité** (de la représentation)
- **efficacité** (des raisonnements)

2- Adoptent l'idée de **représentation structurée** (frame-based) avec une différence entre :

- **aspects terminologiques** : comment forme-t-on des descriptions composées à partir de primitives de représentation
- **aspects assertionnels** : comment attribue-t-on une valeur de vérité à des assertions

3- Les inférences sont focalisées sur la **vérification de la subsomption** et la **classification automatique des concepts** dans la hiérarchie

5.6 Les représentations hybrides : historique

1- Développement de formalismes de réseaux sémantiques guidés par les applications

- ❑ solutions ad hoc
- ❑ sémantique peu fiable

2- Examen critique et efforts de rigueur

- ❑ Thèse de Brachman (1978)
- ❑ Travaux de Brachman et Levesque (1980s)

3- Les représentations hybrides : la famille KL-ONE

- ❑ KL-ONE, KL-TWO, KRYPTON, BACK, CLASSIC, ...

4- Développements actuels sur « ontological web »

[http://www.ksl.stanford.edu/people/dlm/papers/ontologies-come-of-age-mit-press-\(with-citation\).htm](http://www.ksl.stanford.edu/people/dlm/papers/ontologies-come-of-age-mit-press-(with-citation).htm)

Sources documentaires

• Ouvrages / articles

- ❑ Ginsberg M. (93) : *Essentials of Artificial Intelligence*. Morgan Kaufmann 1993.
- ❑ Nilsson N. (98) : *Artificial Intelligence : A new synthesis*. Morgan Kaufmann, 1998.
- ❑ Rich E. (83) : *Artificial Intelligence*. Mc Graw Hill. (une trad. française existe)
- ❑ Russel S. & Norvig P. (03) : *Artificial Intelligence : A modern approach*. Prentice Hall, 2003.

• Sites web