

Les systèmes experts

Ordre 0, Ordre 1.
Systèmes experts et Prolog.
La question en question.

Domaines d'application et leurs importances

Agriculture	Environnement	Meteorology
Business	Geology	Military
Chemistry	Image Processing	Mining
Communications	Information Management	Power Systems
Computer Systems	Law	Science
Education	Manufacturing	Space Technology
Electronics	Mathematics	Transportation
Engineering	Medicine	

DESS IAGL - Université de Lille 1 Systèmes d'inférences Jean-Christophe Routier

Nombre cumulés de SE développés

Year	Cumulative Number
'85	50
'86	350
'87	1,100
'88	2,200
'92	12,500

DESS IAGL - Université de Lille 1 Systèmes d'inférences Jean-Christophe Routier

Types et répartition des problèmes traités

Problem Type	Description
Control	Governing system behavior to meet specification
Design	Configuring Objects under constraint
Diagnosis	Inferring System malfunctions from observables
Instruction	Diagnosing, debugging, and repairing student behavior
Interpretation	Inferring situation description from data
Monitoring	Comparing observations to expectations
Planning	Designing actions
Prediction	Inferring likely consequences of given situations
Prescription	Recommending solution to system malfunction
Selection	Identifying best choice from a list of possibilities
Simulation	Modelling the interaction between system components

DESS IAGL - Université de Lille 1 Systèmes d'inférences Jean-Christophe Routier

Plate-formes et langages de développement

Platform Distribution:

Platform	% Applications
PC	~65
Workstation	~25
Mini	~10
Mainframe	~5

Language Distribution:

Language	% Applications
Shell	~45
Lisp	~25
Prolog	~15
OFS	~10
Other	~5

DESS IAGL - Université de Lille 1 Systèmes d'inférences Jean-Christophe Routier

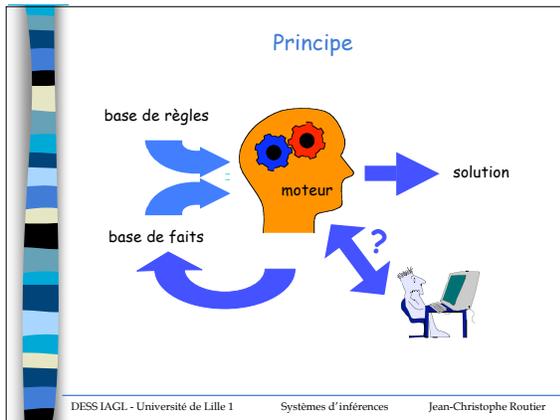
Introduction

Objectif affiché :
remplacer les experts humains d'un domaine ou les aider dans leurs expertises

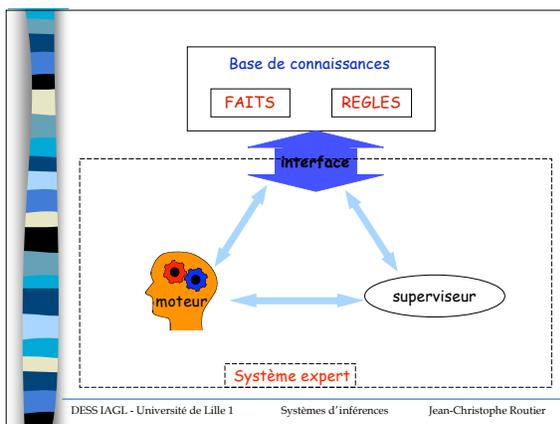
Domaines d'application : nombreux et variés

Principe :
On dispose de connaissances sur un domaine et d'un moteur d'inférences. À partir d'informations contextuelles factuelles, on infère de nouvelles connaissances sur le problème examiné.

DESS IAGL - Université de Lille 1 Systèmes d'inférences Jean-Christophe Routier



- ### Constituants
- Un système expert est composé de :
- **la base de connaissances :**
 - **base de faits :** code la connaissance sur l'étude en cours
Son état évolue en cours d'expertise (*mémoire de travail*)
 - **base de règles :** code la connaissance sur le domaine.
Fixe pour plusieurs expertises.
Règle : **SI condition ALORS action**
 - **le moteur d'inférences :**
 - composés des algorithmes utilisés pour la déduction :
 - chaînage avant
 - chaînage arrière
 - calcul des faits déductibles
 - calcul de question
 - chaînage mixte
- DESS IAGL - Université de Lille 1 Systèmes d'inférences Jean-Christophe Routier



- ### Caractéristiques
- les connaissances sur le domaine peuvent être représentées de manière
 - **finie** (booléen, symbole, nombre)
 - **incertaine** ou **floue**
 - la programmation de l'expertise est **déclarative**
 - **indépendance** entre moteur d'inférences et base de connaissances
systèmes experts essentiels
→ séparation du procédural et du déclaratif
 - **justification** du raisonnement
 - recherche sur un **but** précis ou pas
 - données **monotones** ou pas
 - interrogation de l'utilisateur
- DESS IAGL - Université de Lille 1 Systèmes d'inférences Jean-Christophe Routier

- ### Classification des systèmes experts
- 3 classes :
- **ordre 0**
fondé sur le calcul propositionnel.
Les faits sont à valeurs booléennes.
SI agé_de_plus_de_18_ans ALORS majeur
 - **ordre 0+ ou 0.5**
les faits peuvent être à valeurs réelles ou symboliques
SI age ≥ 18 ALORS statut=majeur
 - **ordre 1**
basés sur le calcul des prédicats
utilisation des variables et de l'unification
SI age(X, Age) ET Age ≥ 18 ALORS majeur(X)
- DESS IAGL - Université de Lille 1 Systèmes d'inférences Jean-Christophe Routier

- ### Quelques systèmes experts
- Spécifiques**
- **Dendral** (1965) détermination de composés chimiques à partir de données spectrométriques
 - **Mycin** (1970) expertise en bactériologie (diagnostic et traitement)
 - **Prospector** (1978) évaluation géologique de sites (probabilité de présence de gisements)
- Générateurs**
- Guru
 - SNARK
 - EMycin
 - CLIPS (NASA)
 - Nexpert Object (Neuron Data)
- DESS IAGL - Université de Lille 1 Systèmes d'inférences Jean-Christophe Routier

Principe de réalisation

- trouver un expert ou plusieurs (c'est plus fiable) sur le domaine visé par l'expertise 
- choisir un générateur de systèmes experts et déterminer les contraintes sur la représentation des connaissances (variables ? valeurs floues ? etc.) en fonction des possibilités 
- interroger l'expert en lui demandant d'exprimer les valeurs clés de ses analyses et les règles d'inférences **ingénieur cognitif** 
- construire la base de règles 
- tester 

DESS IAGL - Université de Lille 1 Systèmes d'inférences Jean-Christophe Routier

Représentation des connaissances

Base de Faits
et
Base de Règles

les faits

- 3 états possibles (**métavaleurs**) :
 - **CONNU** : une valeur a été attribuée (par déduction ou par l'utilisateur)
 - **INCONNU** : aucune information connue
 - **INDETERMINEE** : pas de valeurs connue et l'utilisateur a dit "je ne sais pas"
- 3 transitions possibles généralement (inférences monotones) :

INCONNU → CONNU	INDETERMINE → CONNU
INCONNU → INDETERMINE	

Si non monotonie, on peut avoir : CONNU → INCONNU
- des options : **demandable** et **affichable**, **ouvert** ou **fermé**
- des variantes :
 - coefficients de **vraisemblance** (*maladie = rougeole* (0.6))
 - introduction de **variables** (ordre 1)
 - valeurs **floues** (*taille = grande*)

DESS IAGL - Université de Lille 1 Systèmes d'inférences Jean-Christophe Routier

les règles

SI conjonction de littéraux/prémisses **ALORS** conclusion/action

Exemple de base de règles (ordre 0)

SI fleur et graine ALORS phanérogame
 SI phanérogame et graine nue ALORS sapin
 SI phanérogame et 1-cotylédone ALORS monocotylédone
 SI phanérogame et 2-cotylédone ALORS dicotylédone
 SI monocotylédone et rhizome ALORS muguet
 SI dicotylédone ALORS anémone
 SI monocotylédone et non rhizome ALORS lilas
 SI feuilles et fleur ALORS cryptogame
 SI cryptogame et non racine ALORS mousse
 SI cryptogame et racine ALORS fougère
 SI non feuilles et plante ALORS thallophyte
 SI thallophyte et chlorophylle ALORS algue
 SI thallophyte et non chlorophylle ALORS champignon
 SI non feuilles et non fleur et non plante ALORS colibacille

DESS IAGL - Université de Lille 1 Systèmes d'inférences Jean-Christophe Routier

Utilisation de variables

permet une **compacité** des connaissances

Base composée de nombreux faits

sans variable : "autant" de faits <i>grand-père</i> (?,???)	avec variable : une règle <i>SI père(X,Y) ET père(Y,Z) ALORS grand-père (X,Z)</i>
---	---

Problème : complexité pour le filtrage des règles par la base de faits

DESS IAGL - Université de Lille 1 Systèmes d'inférences Jean-Christophe Routier

Conjonctions et disjonctions

- **ET** en conclusion :

SI a ALORS b ET c	≡	SI a ALORS b SI a ALORS c
-------------------	---	------------------------------
- **OU** en condition :

SI a OU b ALORS c	≡	SI a ALORS c SI b ALORS c
-------------------	---	------------------------------

DESS IAGL - Université de Lille 1 Systèmes d'inférences Jean-Christophe Routier

Disjonctions en conclusion

■ OU en conclusion : plus problématique

$SI\ a\ ALORS\ b\ OU\ c$

quelle sémantique ? dans le cas où a est vrai, que faire ?

- dédoubler la base de faits : l'une avec b , l'autre avec c
- ajouter b et c ? (alors il fallait mettre un ET)
- ajouter b puis backtrack avec c (si déduction impossible ou recherche d'une autre solution)

Généralement quand un expert exprime une telle règle : OU = XOR

et alors : $SI\ a\ ALORS\ b\ OU\ c \quad \equiv \quad SI\ a\ ET\ \neg b\ ALORS\ c$
 $SI\ a\ ET\ \neg c\ ALORS\ b$

DESS IAGL - Université de Lille 1 Systèmes d'inférences Jean-Christophe Routier

Analyse de la base de règles

Elle permet :

- classification des faits :
 - **de base** : n'apparaissent qu'en condition (généralement *demandable*)
 - **intermédiaire** : apparaissent en condition et conclusion de règles ils représentent les étapes intermédiaires du raisonnement et permettent de l'expliquer
 - **conclusifs** : n'apparaissent qu'en partie conclusion se sont les résultats possibles de l'expertise
- prévision d' "efficacité"
 - plus le nombre de prémisses dans une règle est important, plus la déduction de nouveaux faits risque d'être longue (base *large*)
 - plus le nombre de règles permettant de passer d'un fait de base à un fait conclusif est élevé, plus l'expertise risque d'être longue (base *haute*)

outils : graphes de dépendance arbres ET/OU

DESS IAGL - Université de Lille 1 Systèmes d'inférences Jean-Christophe Routier

Choix des faits conclusifs

Cas d'un SE d'ordre 0 permettant de déterminer en fonction de critères le type de logement convenant le mieux à un client. Les différents buts possibles sont à choisir parmi :

$F2\ pavillon\ fermette$ etc.

Il faut donc effectuer une expertise avec chacun des différents buts possibles, ce qui revient à poser les questions :
 "est-ce que $F2$ convient ?" "est-ce que $pavillon$ convient ?" etc.

Autre solution : ajouter un fait conclusif, *trouve* et les règles : $SI\ F2\ ALORS\ trouve$ $SI\ pavillon\ ALORS\ trouve$ etc. et effectuer les expertises avec comme but *trouve*, quand le but a été prouvé, il ne reste qu'à examiner la base de faits afin de connaître le type de logement

DESS IAGL - Université de Lille 1 Systèmes d'inférences Jean-Christophe Routier

Le moteur d'inférences

Chaînages avant, arrière et mixte

Deux mécanismes de base

■ chaînage avant

basé sur le **modus ponens** :

$SI\ (A \Rightarrow B\ ET\ A)\ ALORS\ B$

■ chaînage arrière

basé sur le **modus tollens** :

$SI\ (A \Rightarrow B\ ET\ \neg B)\ ALORS\ \neg A$

DESS IAGL - Université de Lille 1 Systèmes d'inférences Jean-Christophe Routier

Chaînage avant

Principe

à partir d'un état de la base de faits, effectuer toutes les déductions logiquement possibles

saturation de la base de faits

exemple :

$BR = SI\ a\ ALORS\ c$ et $BF_0 = \{ a, b \}$
 $SI\ a\ ET\ d\ ALORS\ e$
 $SI\ b\ ET\ c\ ALORS\ d$
 $SI\ e\ ALORS\ f$

alors on peut déduire : $c\ d\ e\ f$

DESS IAGL - Université de Lille 1 Systèmes d'inférences Jean-Christophe Routier

Mécanisme

on cherche les règles dont la condition est vérifiée et on applique leurs conclusions

Plusieurs étapes :

- sélection
 - suppression de règles (ex : définitivement non déclençables ou concluant sur un fait déjà établi)
- détermination des règles déclençables (condition satisfaite)
- résolution de conflits : choisir la règle à déclencher selon *heuristiques*
- activation : appliquer la conclusion

Arrêt lorsque :

- il n'y a plus de règles déclençables
- le but recherché a été établi (pas dans un "vrai" chaînage avant)

DESS IAGL - Université de Lille 1 Systèmes d'inférences Jean-Christophe Routier

Un algorithme de chaînage avant (0+)

activer toutes les règles de la base
Tant qu'il existe des règles actives déclençables
 choisir R une de ces règles ← **résolution de conflits**
Si la conclusion de R ne contredit pas la base de faits
alors
 appliquer la conclusion de R et désactiver R
sinon
 base inconsistante STOP
fin Si
fin Tant que

La désactivation des règles assure la terminaison de l'algorithme.

En ordre 1, on ne peut pas désactiver les règles.

$SI\ pair(X)\ ALORS\ pair(s^2(X)) \longrightarrow BF_\infty = \{pair(s^{2n}(0)), \forall n \geq 0\}$
 et $BF_0 = \{pair(0)\}$

DESS IAGL - Université de Lille 1 Systèmes d'inférences Jean-Christophe Routier

Résolution de conflits

Problème du choix de la règle déclençable à activer

Différentes *heuristiques* possibles :

- dans l'ordre de l'écriture de la base
- au hasard
- toutes les règles déclençables simultanément
- à partir de coefficients de priorité sur les règles
- règle dont la condition utilise les faits les plus récemment déduits
- à partir de règles de contrôle (*méta-règles*)

DESS IAGL - Université de Lille 1 Systèmes d'inférences Jean-Christophe Routier

Exemple

R1 SI fleur et graine ALORS phanérogame
 R2 SI phanerogame et graine nue ALORS sapin
 R3 SI phanerogame et 1-cotylédone ALORS monocotylédone
 R4 SI phanerogame et 2-cotylédone ALORS dicotylédone
 R5 SI monocotylédone et rhizome ALORS muguet
 R6 SI dicotylédone ALORS anémone
 R7 SI monocotylédone et non rhizome ALORS lilas
 R8 SI feuilles et fleur ALORS cryptogame
 R9 SI cryptogame et non racine ALORS mousse
 R10 SI cryptogame et racine ALORS fougère
 R11 SI non feuilles et plante ALORS thallophyte
 R12 SI thallophyte et chlorophylle ALORS algue
 R13 SI thallophyte et non chlorophylle ALORS champignon
 R14 SI non feuilles et non fleur et non plante ALORS colibacile





$BF_0 = \{\text{rhizome, fleur, graine, 1-cotylédone, feuilles, non racine}\}$

Résolution des conflits : ordre d'écriture des règles $BF_\infty ?$

DESS IAGL - Université de Lille 1 Systèmes d'inférences Jean-Christophe Routier

Choix de la résolution de conflits ?

Théorème :

En fonctionnement **monotone**, soient BR une base de règles d'ordre 0+, sans métavaleur et BF_0 une base de faits, alors :

- quel que soit l'ordre des prémisses dans les règles
- quelle que soit la méthode de résolution des conflits = quel que soit l'ordre des règles

BR sature BF_0 en la même base BF_∞ .

■ Si **non monotone** : remise en question possible des déductions

$R_1 : SI\ a\ ALORS\ retirer\ b$ $R_2 : SI\ b\ ALORS\ retirer\ a$

et $BF_0 = \{a, b\} \xrightarrow{R_1} BF_1 = \{a\} = BF_\infty$
 $BF_0 = \{a, b\} \xrightarrow{R_2} BF_1 = \{b\} = BF_\infty$

DESS IAGL - Université de Lille 1 Systèmes d'inférences Jean-Christophe Routier

■ si **métavaleurs**

$R_1 : SI\ a\ INCONNU\ ALORS\ b$ $R_2 : SI\ c\ ALORS\ a$

$BF_0 = \{c\} \xrightarrow{R_1} BF_1 = \{c, b\} \xrightarrow{R_2} BF_2 = \{a, b, c\} = BF_\infty$

et $BF_0 = \{c\} \xrightarrow{R_2} BF_1 = \{c, a\} = BF_\infty$

■ si **ordre 1**

$R_1 : SI\ pair(X)\ ALORS\ pair(s^2(X))$ $R_2 : SI\ pair(X)\ ALORS\ impair(s(X))$

◆ on déclenche dans l'ordre d'écriture des règles :

$BF_0 = \{c\} \xrightarrow{R_1^*} BF_\infty = \{pair(s^{2n}(0)), \forall n \geq 0\}$

◆ on déclenche simultanément toutes les règles déclençables :

$BF_0 = \{c\} \xrightarrow{\{R_1, R_2\}^*} BF_\infty = \{pair(s^{2n}(0)), impair(s^{2n+1}(0)), \forall n \geq 0\}$

DESS IAGL - Université de Lille 1 Systèmes d'inférences Jean-Christophe Routier

Remarques

Avec chaînage avant :

- pas besoin de but
- pénalisé par beaucoup de règles avec les mêmes prémisses
- déduit tout ce qui peut l'être
- nécessité de disposer dès le début de toutes les données (pas d'interaction avec l'utilisateur)
- à l'issue d'une saturation, il est possible que certains ne soient plus déductibles :

$$R_1 : \text{SI } a \text{ ALORS } \neg b \qquad R_2 : \text{SI } b \text{ ALORS } c$$

$$BF_0 = \{a\} \xrightarrow{R_1} BF_1 = \{a, \neg b\} = BF_\infty$$

c n'est plus déductible

DESS IAGL - Université de Lille 1 Systèmes d'inférences Jean-Christophe Routier

Algorithme de calcul des faits déductibles

déclarer déductibles tous les faits connus et inconnus demandables
activer toutes les règles
Tant qu'il existe des règles actives telles que :
leur condition n'a aucune prémisses fausses et
à chacune de ses prémisses déductibles ou à méta-valeur :
déclarer déductibles les faits de la conclusion
désactiver la règle
fin Tant que

Cet algorithme calcule en fait un **sur-ensemble** des faits déductibles.

SI *a* ALORS *b*
SI $\neg a$ ALORS *c* l'algorithme déclare *d*
SI *b* et *c* ALORS *d* déductible

Mais il est suffisant pour des raisons d'efficacité

DESS IAGL - Université de Lille 1 Systèmes d'inférences Jean-Christophe Routier

Chaînage arrière

Principe

On recherche les connaissances nécessaires à la preuve d'un but donné.
On considère les règles qui ont le but pour conclusion, si la condition de l'une de ces règles est vérifiée alors succès, sinon les prémisses inconnues deviennent les nouveaux (sous-)buts.

exemple :

SI *a* ALORS *c*
BR= SI *a* ET *d* ALORS *e* et BF = { *a*, *b* }
SI *b* ET *c* ALORS *d*
SI *e* ALORS *f*

but = f

DESS IAGL - Université de Lille 1 Systèmes d'inférences Jean-Christophe Routier

Deux méthodes

arbres ET/OU

SI *a* ALORS *c*
BR= SI *a* ET *d* ALORS *e*
SI *b* ET *c* ALORS *e*
SI *e* ALORS *f*

arbre de listes de buts
(gestion par pile de buts)

et BF = { *a*, *b* } but = *f*

Si une branche d'un nœud **ET** donne un **échec**, il est inutile de vérifier les autres

Si une branche d'un nœud **OU** donne un **succès**, il est inutile de calculer les autres

DESS IAGL - Université de Lille 1 Systèmes d'inférences Jean-Christophe Routier

Résolution de conflits

- choix de la règle concluant sur le but
 - ◆ dans l'ordre d'écriture dans la base
 - ◆ au hasard
 - ◆ celle avec le moins de prémisses inconnues
 - ◆ coefficient de priorité
 - ◆ méta-règles
- choix parmi les prémisses du fait devenant le nouveau but
 - ◆ ordre d'écriture dans la règle
 - ◆ demandables en priorité
 - ◆ non demandables en priorité

DESS IAGL - Université de Lille 1 Systèmes d'inférences Jean-Christophe Routier

Exemple

SI *a* ET *b* ET *c* ALORS *d*
SI *i* ET *h* ALORS *b*
SI *a* ET *f* ALORS *b*
SI *a* ALORS *i*
SI *e* ET *f* ALORS *d*
SI *a* ALORS *f*
SI *k* ET *l* ALORS *e*
SI *a* ALORS *l*

BF = {a, k}

but = d

DESS IAGL - Université de Lille 1 Systèmes d'inférences Jean-Christophe Routier

Remarques

Avec chaînage arrière :

- guidé par un but
- pénalisé par beaucoup de règles avec la même conclusion
- n'utilise que les règles nécessaires
- nécessité de disposer dès le début de toutes les données

DESS IAGL - Université de Lille 1 Systèmes d'inférences Jean-Christophe Routier

Chaînage mixte

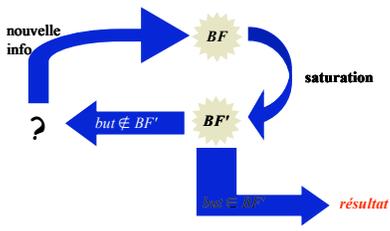
Constat :
 Les chaînages avant et arrière nécessitent une connaissance suffisante dès le début. Si les connaissances initiales sont insuffisantes, la conclusion recherchée peut ne pas pouvoir être établie.

Solution :
 Le système doit pouvoir poser des questions à l'utilisateur en cours de raisonnement afin de compléter ses connaissances, notamment pour les informations non calculables par déduction.



DESS IAGL - Université de Lille 1 Systèmes d'inférences Jean-Christophe Routier

Principe



DESS IAGL - Université de Lille 1 Systèmes d'inférences Jean-Christophe Routier

Poser une question

Le système ne peut poser des questions que sur les faits **demandables**.

Le choix de la question posée est un critère pour mesurer la qualité (l'intelligence) d'un SE.

Principe
 effectuer un chaînage arrière jusqu'à atteindre un but demandable



Les réponses possibles sont:

VRAI , FAUX , valeur,
 "Je ne sais pas" (INCONNU)

DESS IAGL - Université de Lille 1 Systèmes d'inférences Jean-Christophe Routier

Un algorithme

```

poser_question(but) :      (but supposé déductible)
  fait courant = but
  Tant que fait courant non demandable
    déterminer une règle concluant sur fait courant dont chaque
    prémisses est : satisfait, déductible ou méta-valeur
    déterminer dans cette règle un fait inconnu
    fait courant = ce fait
  fin Tant que
  poser une question sur fait courant
  
```

résolutions de conflits

choix "classiques" pour les résolutions des conflits :

- règle : celle ayant le moins de prémisses inconnus
- fait : on préfère les non demandables

SI a ET b ALORS d
 SI c ALORS #
 but : d

DESS IAGL - Université de Lille 1 Systèmes d'inférences Jean-Christophe Routier

Algorithme de chaînage mixte

```

poser_question(but) :
  effectuer une saturation
  calculer les faits déductibles
  Tant que but est INCONNU et déductible
    poser_question(but)
    effectuer une saturation
    calculer les faits déductibles
  fin Tant que
  Si but CONNU
    alors donner la valeur de but
    sinon but non déductible
  fin Si
  
```

DESS IAGL - Université de Lille 1 Systèmes d'inférences Jean-Christophe Routier

Exemple

SI g ET h ALORS k
 SI j ALORS k
 SI e ET b ALORS g
 SI a ET c ET d ALORS h
 SI e ET a ALORS j
 SI a ALORS b

Faits demandables = faits de base

Résolution de conflits pour question :

choix de règle et fait dans l'ordre d'écriture

$BF_0 = \{d\}$ But : k

- que se passe-t-il si a devient *Faux* ?
- que donne *chaînage mixte*(k) ?
(réponses : *NON* puis toujours *OUI*)

DESS IAGL - Université de Lille 1 Systèmes d'inférences Jean-Christophe Routier

Exemple

R1. SI a ET b ET c ET d	ALORS $Conc$	
R2. SI u ET v	ALORS $Conc$	
R3. SI w ET z ET y	ALORS $Conc$	$BF_0 = \{\neg u\}$
R4. SI j	ALORS z	
R5. SI j	ALORS a	But : $Conc$
R6. SI j	ALORS b	
R7. SI j	ALORS d	
R8. SI f ET g	ALORS c	Questions :
R9. SI a ET k	ALORS c	<i>Faux</i> pour w ,
R10. SI w	ALORS k	<i>Vrai</i> pour les autres.
R11. SI j ET e	ALORS g	

- ◆ chaînage avant : on parcourt les règles dans leur ordre d'écriture dans la base
- ◆ chaînage arrière, on préfère :
 - sur les règles : les règles avec de moins de prémisses inconnues
 - sur les faits : les faits non demandables.

Dans les deux cas, en situation d'égalité on prend l'ordre d'écriture.

DESS IAGL - Université de Lille 1 Systèmes d'inférences Jean-Christophe Routier