



# **Cours 5 - Les Systèmes experts**

DOMINIQUE FONTAINE

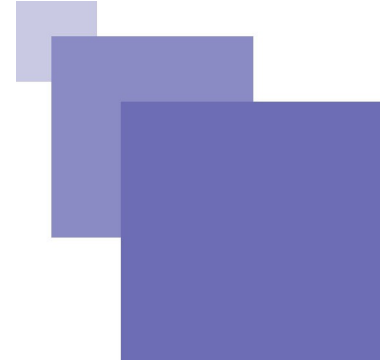
# Table des matières

<b>Introduction</b>	<b>5</b>
<b>I - Tâches d'un système expert</b>	<b>7</b>
A. Résolution de problèmes difficiles.....	7
B. Autres tâches.....	7
C. Retombées directes attendues des systèmes experts.....	8
<b>II - Architecture d'un système expert</b>	<b>9</b>
A. Caractéristiques.....	9
B. Base de faits.....	11
C. Base de connaissances.....	12
1. Heuristiques.....	12
2. Représentation.....	13
D. Règles de production.....	13
1. Définitions.....	13
2. Exemples de règles.....	14
3. Ordre 0/0+.....	15
4. Ordre 1.....	16
5. Intérêt.....	16
E. Moteur d'inférences.....	16
1. Algorithme de base.....	16
2. Chainage avant.....	17
3. Chainage arrière.....	20
4. Filtrage d'ordre 1.....	22
5. Amélioration du filtrage.....	23
6. Etape de décision.....	24
7. Etape de déclenchement.....	25
<b>III - Classification des systèmes experts</b>	<b>27</b>

---

A. Diagnostic.....	27
B. Interprétation.....	27
C. Monitoring.....	29
D. Prédiction.....	31
E. Conception.....	32
F. Planification.....	32
G. Débogage & réparation.....	33
H. Autres.....	33

# Introduction



## Quand faire des systèmes experts ?

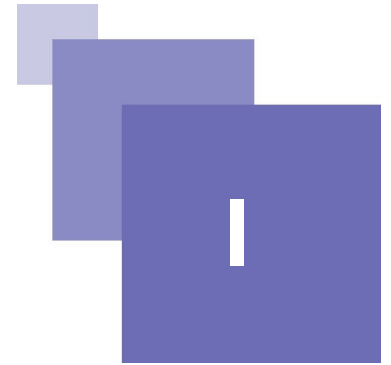
*Quand on ne dispose pas d'autres solutions :*

- Pas d'algorithme connu.
- Pas d'approche mathématique.

## Le contexte est favorable :

- Quand le projet est économiquement viable
- Quand il existe une expertise humaine, c'est-à-dire une personne capable de faire les analyses et de prendre les décisions appropriées
- Quand cette expertise est clairement disponible et apparaît formalisable
- Quand le domaine est bien délimité
- Quand les paramètres qualitatifs sont plus importants que les paramètres quantitatifs

# Tâches d'un système expert



Résolution de problèmes difficiles	7
Autres tâches	7
Retombées directes attendues des systèmes experts	8

## A. Résolution de problèmes difficiles

- Agir efficacement et rapidement
- Tirer des conclusions à partir de relations complexes
- Poser des questions
- Expliquer le raisonnement

Niveau d'intervention :

### Remplacement d'un expert

- Pour automatiser une tâche routinière
- Par besoin d'une expertise dans un environnement hostile

### Assistance à un expert

- Pour gérer la complexité
- Pour améliorer la productivité

## B. Autres tâches

### Capturer et préserver le savoir-faire

- Tâche de nos jours très importante

### Rassembler et organiser une connaissance disséminée entre plusieurs experts

- Tâche difficile
- Problèmes liés à la multi-expertise

### Aider à la diffusion des connaissances

- Proposer une même expertise sur divers sites simultanément
- Partager des connaissances



### Exemple

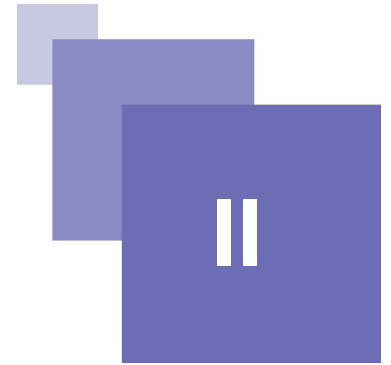
Systèmes à vocation pédagogique

## C. Retombées directes attendues des systèmes experts

- Amélioration des décisions
- Amélioration de la qualité du travail
- Amélioration du service rendu à l'utilisateur
- Réduction des coûts
- Réduction des erreurs, augmentation de la fiabilité

**C'est une alternative à l'expertise**

# Architecture d'un système expert



Caractéristiques	9
Base de faits	11
Base de connaissances	12
Règles de production	13
Moteur d'inférences	16

**ATTENTION ! A partir de maintenant, S.E. veut dire :**

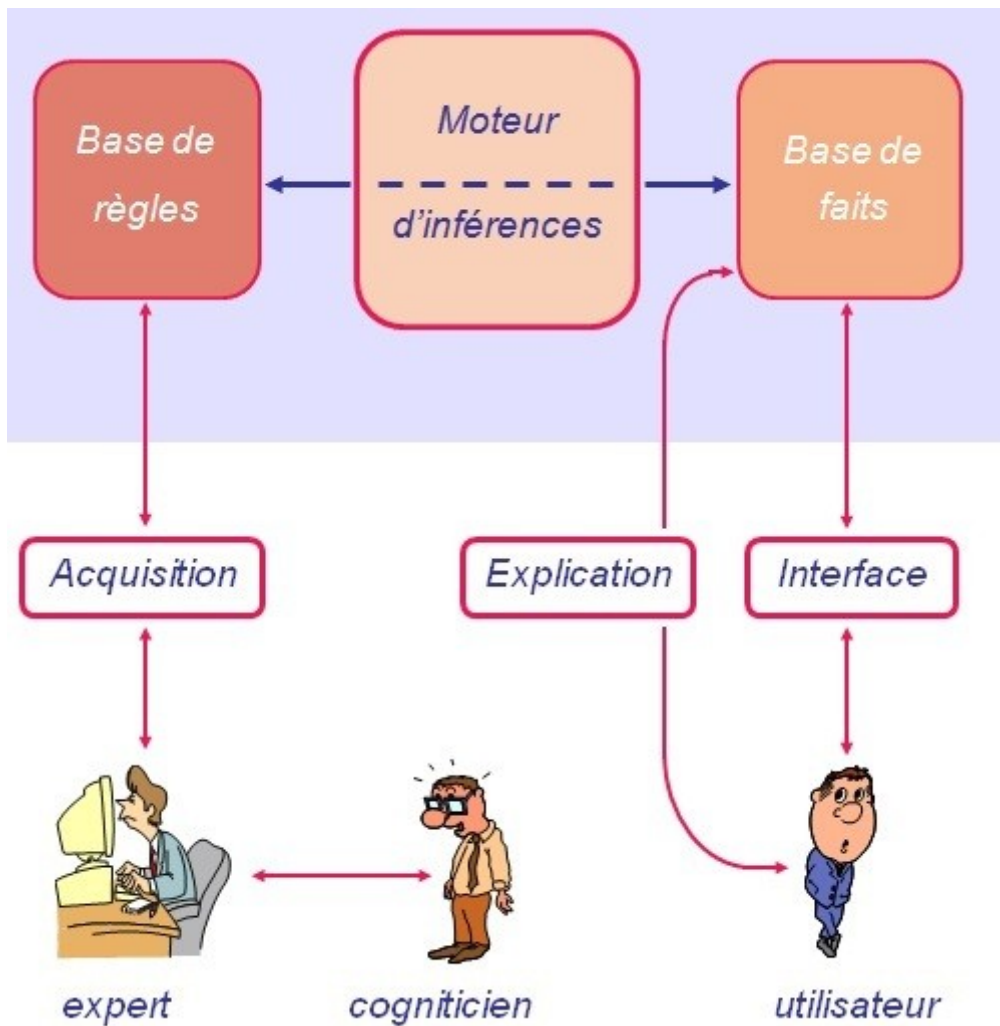
*Système Expert à Base de Règles.*

Illustrant la notion de Système à Base de Règles ou SBR

## A. Caractéristiques

Illustration

---



Architecture d'un système expert



#### Fondamental : La base de connaissances ou base de règles

- Une mémoire à long terme
- Les règles en principe « en vrac »
- Peut aussi contenir des faits "permanents"



#### Fondamental : La base de faits ou mémoire de travail

- Une mémoire à court terme
- L'ensemble des "faits" relatifs au problème



#### Fondamental : Le moteur d'inférences

- Confronte les règles à la base de faits
- Système déductif chargé des inférences et de modifier dynamiquement la base de faits



#### Attention : Séparation des connaissances et du moteur d'inférences

- Le moteur d'inférences contrôle l'emploi de la connaissance
- Dissociation profitable au développement
- Accès à la connaissance plus aisé





## Fondamental : Modularité de la connaissance :

- Possibilité de la décomposer en petites unités homogènes et indépendantes
- Facilite la modification des connaissances
- Permet une approche incrémentale

## B. Base de faits



### Définition

Contient au début d'une session un **ensemble d'informations** relatives au **cas considéré**, avant toute intervention du moteur d'inférences

- Des faits avérés (une liste de symptômes)
- Des faits à établir

Est ensuite **enrichie** au fur et à mesure de la résolution du problème :

- à la suite de déductions
- à la suite de questions

## Faits = des propositions



## Exemple

- « la température est de 39.5°C »
- « le réservoir d'essence est vide »

## C. Base de connaissances

## Objectifs

- Validité : consistance, cohérence, complétude
- Robustesse
- Efficacité

- Comment les acquérir ?
- Comment les représenter ?
- Comment les organiser ?
- Comment les valider ?
- Comment expliquer ?

## 1. Heuristiques

## Des connaissances opératoires

- Théorèmes, lois, algorithmes.....



### Définition : Heuristique :

Une heuristique est une connaissance privée fondée sur l'expérience qui, en restreignant l'espace de recherche, aide à résoudre plus efficacement le problème



### Attention

- Par essence, une heuristique est susceptible d'échouer ! Dans ce cas, on en utilise une autre .....
- L'emploi d'heuristiques n'est pas réservé aux seuls experts

### Exemples d'heuristiques



#### Exemple : Diagnostic médical

Si le malade a une température élevée, s'il a mal à la tête et s'il a des vomissements,  
alors penser à la possibilité d'une méningite



#### Exemple : Calcul de primitives

Si l'intégrande contient un terme  $f(x)$  compliqué,  
alors essayer le changement de variable  $u=f(x)$



#### Exemple : Au poker

Si la main est faible, si le total des mises n'est pas trop élevé, et si l'adversaire semble facilement bluffable,  
alors miser fort pour tenter un bluff

## 2. Représentation

### Représentation **NE SIGNIFIE PAS** Mémorisation !!!

- Pouvoir d'expression
- Capacité à faciliter l'accès à l'information
- Capacité à organiser l'information
- Capacité à supporter un raisonnement

### Approches

Opposition entre savoir comment / savoir quoi

Procédurale :

- - modifications difficiles
- - connaissance peu accessible

→ déclarative

## D. Règles de production

### 1. Définitions



#### Définition

- SI conditions ALORS action
- SI  $c_1$  et  $c_2$  et... ET  $c_n$  ALORS A



### Définition : Conditions :

- Encore appelées prémisses
- Testent l'appartenance de faits à la base de faits



### Définition : Action

- A un effet sur la base de faits :
  - ajout d'un fait
  - suppression d'un fait
- Ne modifie pas la base de règles



### Complément

*C'est la représentation privilégiée pour les heuristiques !*

### a) Différents types de règles



### Méthode : Relation :

- Si réservoir vide alors l'auto ne démarre pas



### Méthode : Recommandation :

- Si l'auto ne démarre pas alors prendre un taxi



### Méthode : Directive :

- Si l'auto ne démarre pas & le système d'alimentation en essence est ok alors vérifier le système électrique



### Méthode : Stratégie :

- Si l'auto ne démarre pas alors vérifier le système d'alimentation en essence puis le système électrique



### Méthode : Heuristique :

Si l'auto ne démarre pas & l'auto est une Ford de 1962 alors vérifier le radiateur.

## 2. Exemples de règles



### Exemple : Exemple 1

**R1** Si animal vole et animal pond des oeufs alors animal est un oiseau

**R2** Si animal a des plumes alors animal est un oiseau

**R3** Si animal est un oiseau et animal a un long cou et animal a de longues pattes alors animal est une autruche

**R4** Si animal a des mamelles alors mammifère

**R5** Si animal a des poils alors mammifère

**R6** Si animal mange de la viande alors carnivore

**R7** Si animal a des sabots alors ongulé

**R8** Si animal est un ongulé & rayures noires alors animal est un zèbre

**R9** Si animal est un féliné & tâches noires alors animal est un guépard

Etc .....



### Exemple : Exemple 2

- R1** Si fleur et graine alors phanérogame
- R2** Si phanérogame et graine nue alors sapin
- R3** Si phanérogame et 1-cotylédone alors monocotylédone
- R4** Si phanérogame 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 colibacille

- 1) Si une personne a une pneumonie ALORS elle a de la fièvre
- 2) Jean a une pneumonie
- 3) Jean a de la fièvre

### Interprétation d'une règle de production

#### Modus ponens

$A \Rightarrow B$     donc  $B$

$A$

#### Modus tollens

$A \Rightarrow B$     donc  $\neg A$

$\neg B$

#### Abduction, induction

*Exemples*

### 3. Ordre 0/0+

#### Représentation

« Le fait pour Mr. Lewis d'être né à Dallas lui permet d'obtenir la nationalité américaine »



#### Définition : Représentation en Ordre 0

- **Un fait est une proposition, donc à valeur booléenne.**

SI Lewis\_né\_à\_Dallas

ALORS Lewis\_américain



#### Définition : Représentation en Ordre 0+

- **Un fait est un couple (attribut, valeur) : AV**

SI lieu\_naissance = Dallas

ALORS nationalité = Usa

- **Un fait est un triplet (objet-attribut-valeur) : OAV**

SI (Lewis lieu\_naissance Dallas)

ALORS (Lewis nationalité Usa)

### 4. Ordre 1



#### Définition : Représentation en Ordre 1

- Basée sur le calcul des prédicats.
- Permet de manipuler des variables (locales) en procédant par semi-unification (cf. IA02).
- Un fait est une expression symbolique sans variable.

SI (\$pers lieu\_naissance Dallas)

ALORS (\$pers nationalité américaine)



#### Méthode : Nouvelle généralisation

SI (\$pers lieu\_naissance \$ville)

ET (\$ville pays Usa)

ALORS (\$pers nationalité américaine)

### 5. Intérêt

#### Intérêt proclamé des règles de production

##### Indépendance des règles entre elles

- Pas d'ordre instauré entre les règles
- Pas d'appel direct

##### Déclarativité

- Une règle est une assertion
- Ce formalisme n'oriente pas vers une méthode de résolution particulière

##### Mise à jour facilitée

##### Lisibilité accrue

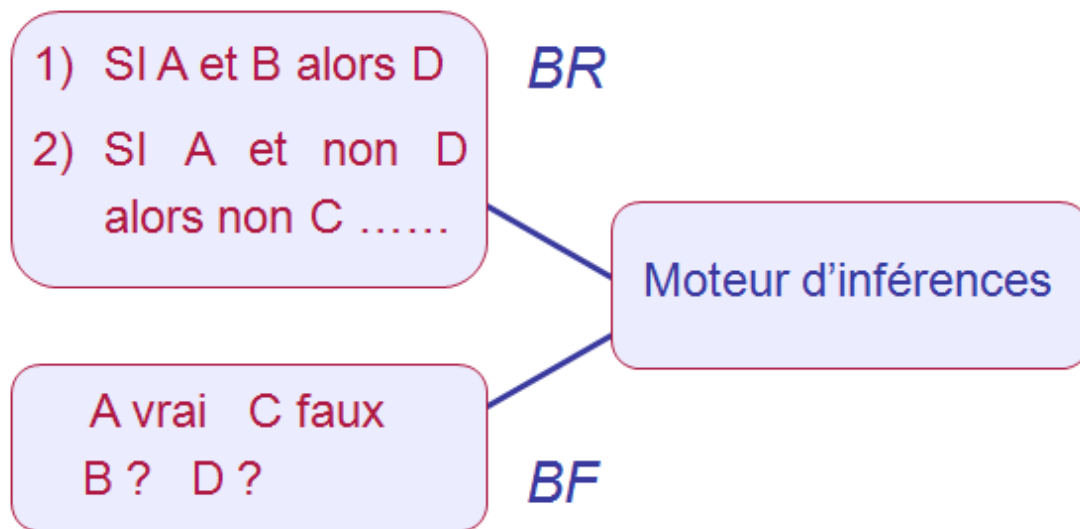


#### Attention

Il convient en fait de pondérer "largement" ces dernières affirmations !

## E. Moteur d'inférences

### 1. Algorithme de base



*Algorithme Général*



#### Définition : Algorithme :

Tant que la condition terminale n'est pas vérifiée  
Répéter le cycle de base

#### déroulement du cycle de base

##### 1) Restriction (phase optionnelle)

Sélection d'ensembles de règles et de faits

##### 2) Filtrage (pattern-matching)

Constitution du sous-ensemble des règles candidates, dit ensemble de conflits

« Une règle est candidate si son déclencheur s'apparie avec des éléments de BR »

##### 3) Décision ou Résolution de conflits

Une règle est choisie selon une stratégie de contrôle

##### 4) Déclenchement

La règle choisie est déclenchée et la base de faits en est modifiée

### 2. Chainage avant

Initialement, un but G et une base de faits BF. On réitère le cycle de base avec pour spécifications :

Pour chaque règle R :

- R candidate si chaque prémisses de R peut être appariée avec des faits de BF
- Déclenchement de R en ajoutant A à BF
- Condition terminale : G dans BF



### Complément : Caractéristiques

- - Mise en œuvre assez aisée
- - Nécessite beaucoup de données
- - Risque de dispersion

a) Algorithme de chaînage avant

### DEBUT

- TANT QUE G n'est pas dans BF ET QU'IL existe dans BR une règle applicable FAIRE
  - Filtrage  $\rightarrow$  E ensemble de conflits
  - Décision  $\rightarrow$  R
  - $BF \leftarrow BF \cup \text{concl}(R)$
  - $BR \leftarrow BR - R$
- FIN DU TANT QUE
- Si G appartient à BF ALORS

G est établi

SINON G n'est pas établi

### FIN

*algorithme de chaînage avant*



### Exemple : Exemple 1 de chaînage avant

#### REGLE R1

SI animal vole ET animal pond des oeufs

ALORS animal est un oiseau

#### REGLE R2

SI animal a des plumes

ALORS animal est un oiseau

#### REGLE R3

SI animal est un oiseau ET animal a un long cou ET animal a de longues pattes

ALORS animal est une autruche

**FAIT F1** : animal a des plumes

**FAIT F2** : animal a un long cou

**FAIT F3** : animal a de longues pattes

-----

**- CYCLE 1**

R2 seule règle déclenchable. Donc R2 est choisie. Déclenchement de R2 : le fait F4 "animal est un oiseau" est ajouté à BF.

BF = { F1 ; F2 ; F3 ; F4 }

**- CYCLE 2**

R3 seule règle déclenchable. Donc R3 est choisie. Déclenchement de R3 : le fait F5 "animal est une autruche" est ajouté à BF.

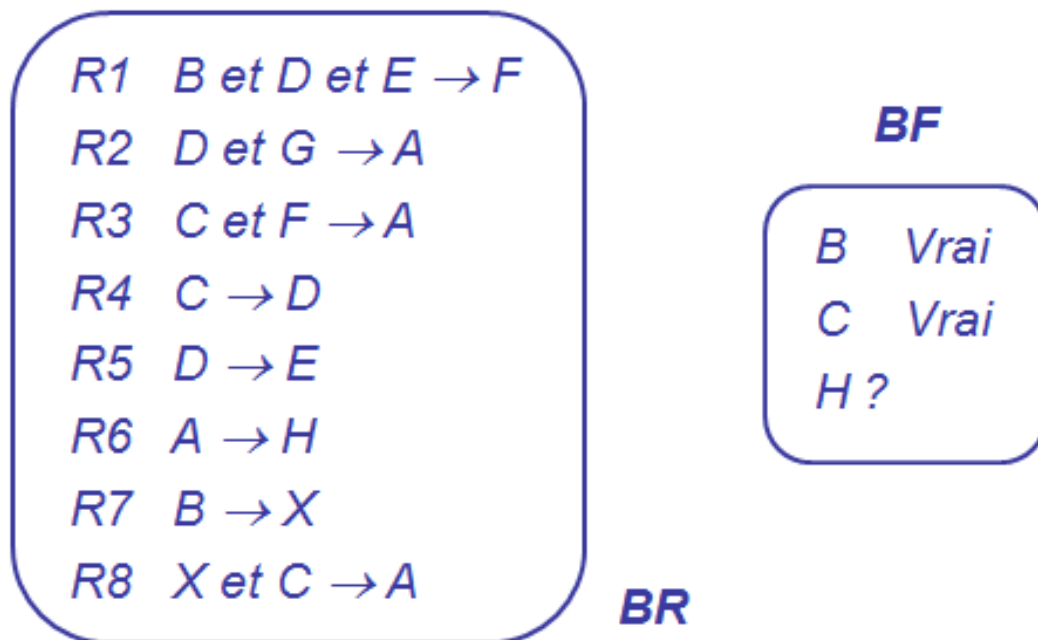
BF = { F1 ; F2 ; F3 ; F4 ; F5 }

**- CYCLE 3**

Arrêt.



Exemple : Exemple 2 en chainage avant



**Stratégie : choix de la première règle**

B, C \_\_\_ B, C, D \_\_\_ B, C, D, E \_\_\_ B, C, D, E, F \_\_\_

B, C, D, E, F, A \_\_\_ B, C, D, E, F, A, **H**

**Stratégie : choix de la dernière règle**

B, C \_\_\_ B, C, X \_\_\_ B, C, X, A \_\_\_ B, C, X, A, **H**

*Exemple 2 de chainage avant*



### 3. Chaînage arrière

Initialement, un but G et une base de faits BF. On réitère le cycle de base avec pour spécifications :

**Pour chaque règle R :**

- - R candidate si A peut être apparié avec un but de BF
- - Déclenchement de R : B et C sont de nouveaux sous-buts à établir
- - Condition terminale : décomposition de G en faits possible (succès) ou impossible (échec)



#### Complément : Caractéristiques

- - Permet de focaliser le raisonnement
- - Permet de poser des questions utiles sur des faits *demandables*



#### Exemple : Exemple 1 en chaînage arrière

##### **REGLE R1**

SI animal vole ET animal pond des oeufs

ALORS animal est un oiseau

##### **REGLE R2**

SI animal a des plumes

ALORS animal est un oiseau

##### **REGLE R3**

SI animal est un oiseau ET animal a un long cou ET animal a de longues pattes

ALORS animal est une autruche

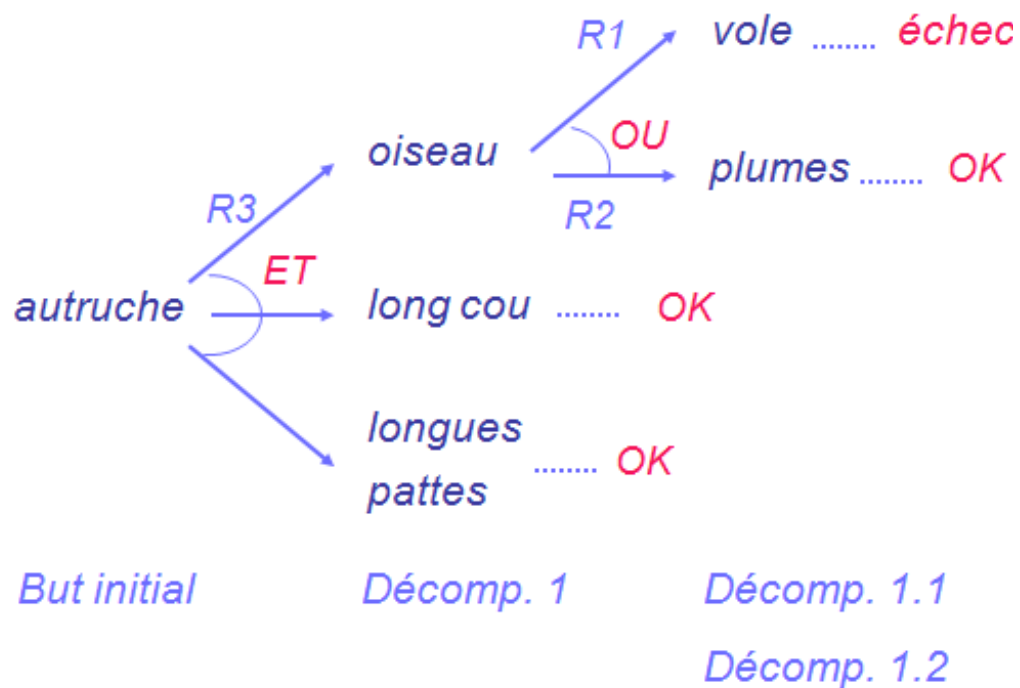
-----

**FAIT F1** : animal a des plumes

**FAIT F2** : animal a un long cou

**FAIT F3** : animal a de longues pattes

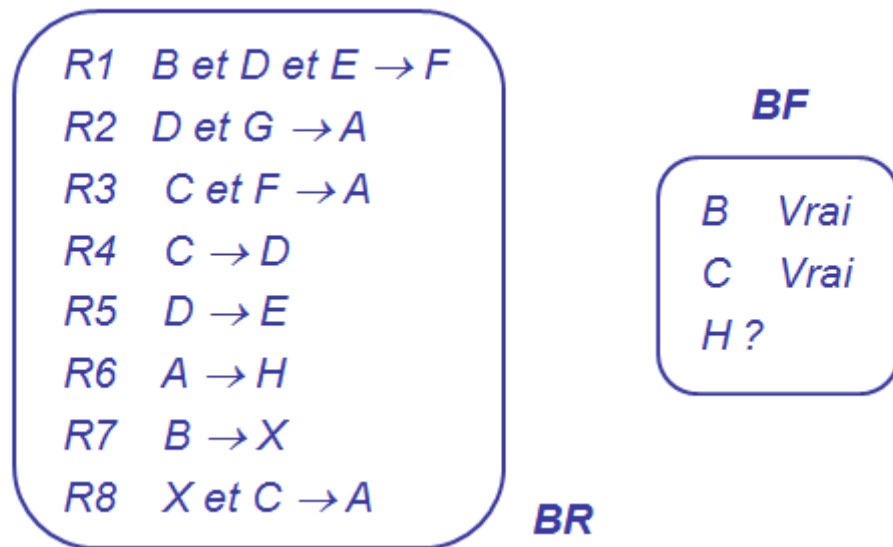
**BUT** : animal est une autruche



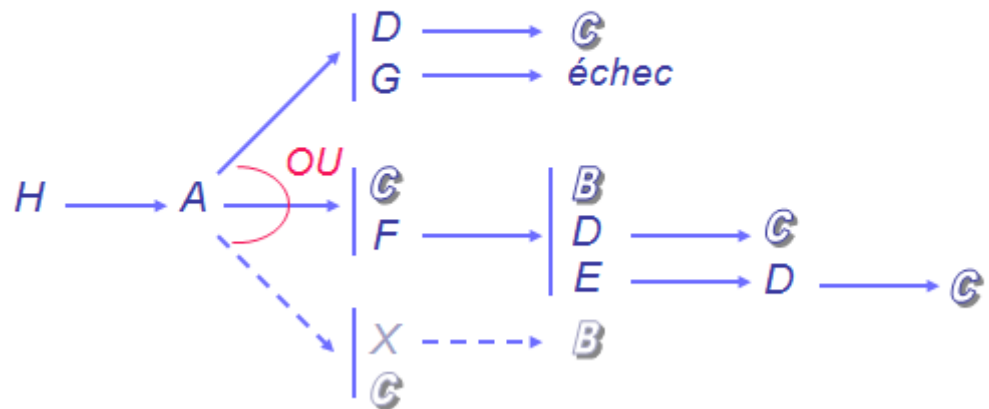
Exemple 1 chainage arrière



Exemple : Exemple 2 chainage arrière



Stratégie : choix de la première règle



Exemple 2 de chaînage arrière

#### 4. Filtrage d'ordre 1

$$R : (a \text{ ?}x \text{ } b) (c \text{ ?}x) \rightarrow \dots\dots$$

### - Recherche des appariements

- Opération de mise en coïncidence (semi-unification)
- Exemple :  $(a \text{ } d \text{ } b) (a \text{ } e \text{ } c)$

### - Vérification des liaisons entres variables

- Opération de jointure
- Exemple :

$$BF = \{ (a \text{ } d \text{ } b) ; (c \text{ } d) \} \rightarrow \text{succès}$$

$$BF_1 = \{ (a \text{ } d \text{ } b) ; (c \text{ } f) \} \rightarrow \text{échec}$$

*Filtrage en ordre 1*



#### Exemple

**R** (pere ?x ?y) (frere ?z ?x) => (oncle ?z ?y)

**BF** { (pere jean luc) }

{ (frere paul jean) }

{ (frere marc jean) }

R est déclenchable deux fois



#### Complément

- Une même règle, associée à des substitutions différentes, peut être candidate plusieurs fois
- La phase de filtrage peut être très coûteuse !

## 5. Amélioration du filtrage

Il existe deux grandes méthodes de filtrage : la **méthode des filtres** et la **méthodes des réseaux**.

$$R1: A \ B \rightarrow \dots\dots\dots$$
$$R2: B \ C \rightarrow \dots\dots\dots$$

$R3: C \rightarrow A \rightarrow \dots$

## Méthode des réseaux

*changements dans BF*



changements dans l'ensemble de conflits

## Amélioration du filtrage

### a) I. Famille de structure de controles

## Recherche exhaustive

- Déclenchement de toute règle déclenchable
- Type de contrôle bien adapté en cas de jugement pondéré (cf. Mycin) et d'univers de recherche faiblement combinatoire

## Choix par évaluation

- Critères systématiques ou dynamiques, sur la priorité des règles ou des faits

## Contrôle heuristique ou raisonné

- Des connaissances spécifiques sur le problème à traiter sont exploitées pour décider du choix de la règle à déclencher => métarègles
- Solution élégante car la logique de contrôle devient elle-même transparente

## b) II. Différents modes de décisions

### i - Décision en chaînage avant

### Stratégies exhaustives :

- Largeur d'abord : on déclenche toutes les règles issues de l'ensemble de conflits

#### Stratégies systématiques :

- La 1ère règle, la dernière règle
- Profondeur d'abord : choix d'une règle ayant pour prémisse le dernier fait établi, ....

#### Stratégies dynamiques :

- Choix d'une règle en fonction de l'intérêt de sa conclusion par rapport au but

#### Stratégies raisonnées : par métarègles

- « Si l'âge du patient est > 70 ans, alors il est préférable d'utiliser les règles relatives au traitement médical »

### ii - Décision en chaînage arrière

#### Stratégies systématiques :

- Profondeur d'abord : très approprié
- Choix des derniers sous-buts développés
- Choix et essai des règles avec retour-en arrière si nécessaire (backtracking)

#### Stratégies raisonnées : par métarègles

- Développement de préférence des sous-buts prometteurs

### iii - Décision en chaînage mixte

- **En avant** : pour exploiter les faits connus ou inférés
- **En arrière** : pour focaliser sur les buts et poser les bonnes questions

## 7. Etape de déclenchement

Fonctionnement :

---



#### Méthode

---

**Ajout de faits** : le cas le plus fréquent

**Parfois suppression de faits** :

**SI** sur(B,A)

libre(B)

main-vide(robot)

**ALORS** Ajouter

- contient-main(robot,B)

- libre(A)

- main-pleine(robot)

Supprimer

- sur(B,A)

- libre(B)

- main-vide(robot)

**Processus non monotone** : abandon de la logique classique

# Classification des systèmes experts



Diagnostic	27
Interprétation	27
Monitoring	29
Prédiction	31
Conception	32
Planification	32
Débogage & réparation	33
Autres	33

## A. Diagnostic



### Définition : Diagnostic

analyse de données afin d'en inférer des dysfonctionnements possibles



### Exemple

Exemples : MYCIN, CADUCEUS, .....

De très nombreux systèmes experts, surtout dans les années quatre-vingt

## B. Interprétation



### Définition : Interprétation

Analyse d'observations ou de données de capteurs, pour en déterminer la signification



### Exemple : Exemple 1 : dendral

#### **DENDRAL (1967)**

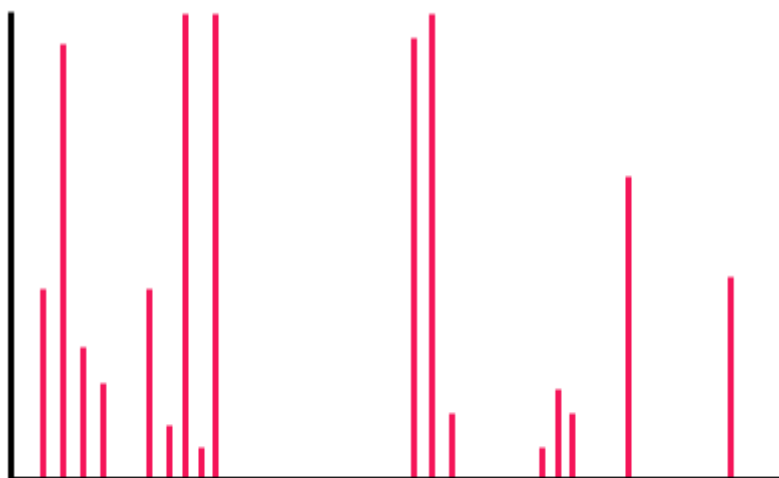
Analyse automatique des spectrogrammes de masse

Aide à la prédiction des structures moléculaires

- Conçu à l'université de Stanford
- Tout d'abord écrit procéduralement
- Devenu ingérable : « apparaît alors la nécessité d'entrer en données le savoir des spécialistes »
- Réécriture heuristique en 1967



## Exemple : Exemple 2 : Spectrogramme de masse



*Spectrogramme de masse*

**SI** il y a deux pics pour les masses X1 et X2

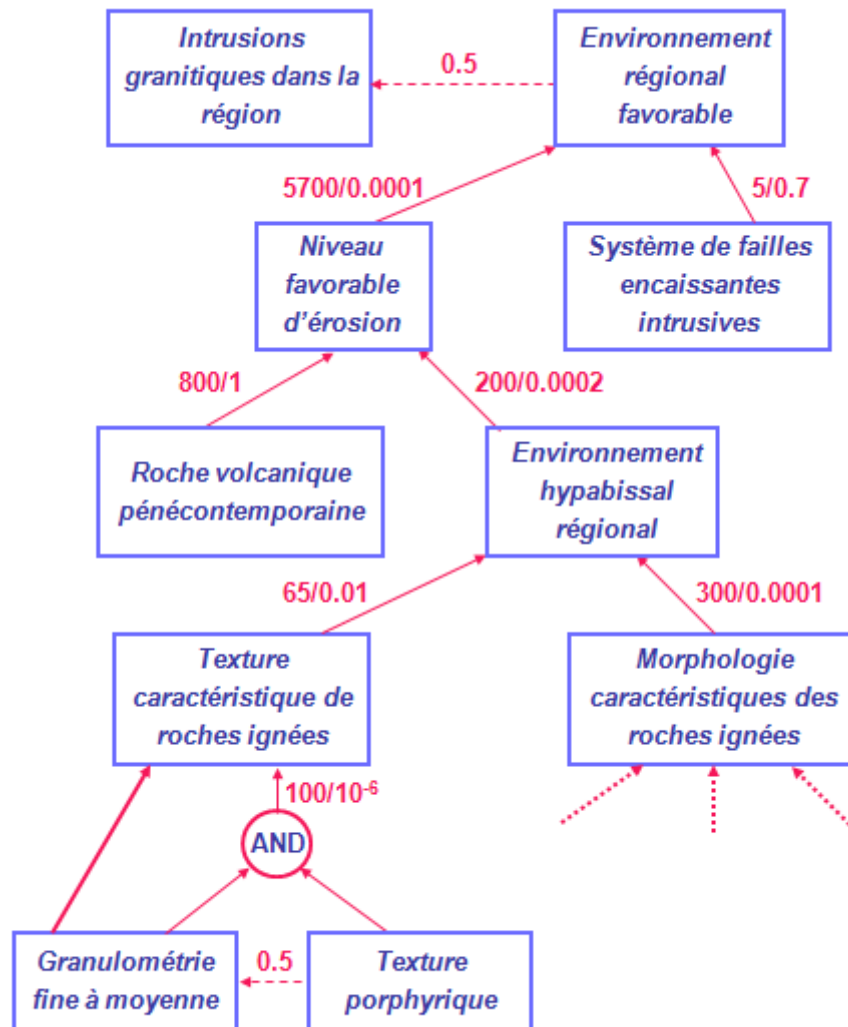
- $X1 + X2 = M + 28$
- X1 - 28 est un pic élevé
- X2 - 28 est un pic élevé
- au moins un des pics X1 ou X2 est élevé

**ALORS** la molécule contient un pic cétone



## Exemple : Exemple 3 : Prospector





*Prospector*

Interprète des données géologiques de surface pour évaluer l'intérêt de prospections minières

- Développé au SRI (Stanford Institute Research), avec l'aide d'une dizaine d'experts
- A prédit la présence d'un gisement de molybdène important (Mt Tolman)
- Utilise différents modèles géologiques : pour l'uranium, le cuivre et le molybdène
- Utilise une structure combinant des règles (plus de 1000) et un réseau sémantique (calculs probabilistes)

## C. Monitoring



Définition : MONITORING :

interprétation en continu des signaux, afin de déclencher une alarme dès que nécessaire



Exemple : Navex

Monitoring sur des données de radar qui permettent d'estimer la vitesse et la

position de la navette spatiale



*Navex*



RK611\* (contrôleur de disque)

Class: UniBus module

Type: disk drive

Supported: yes

Priority Level: buffered NPR

Transfer Rate: 212

**Une règle de XCON :**

If the most current active context is distributing Massbus devices  
& there is a single port disk drive that has not been assigned to a Massbus  
& there are no unassigned dual port disk drives  
& .....

Then assign the disk drive to the Massbus

**BILAN POUR XCON :**

- - Un des premiers systèmes experts (années quatre-vingt) à être commercialement réussi et rentable→ Gain de plusieurs millions de dollars
- - Utilisation en usine
- - Une efficacité avérée
- → Temps de réponse divisé par 12
- → Meilleure qualité de service
- - Réduction considérable du personnel technique dédié à cette tâche

## F. Planification



### Définition : Planification

Génération de séquences d'actions afin d'atteindre un but



### Exemple : MOLGEN

- Domaine : biologie moléculaire
- Planification de processus chimiques dans le but d'analyser et de synthétiser de l'ADN
- Versions ultérieures : génération d'un plan de manipulations génétiques en vue de construire une entité biologique donnée

## G. Débogage & réparation



### Définition : Débogage & réparation

détection de fautes et proposition d'une procédure pour y remédier



### Exemple : DELTA CATS

Identification de pannes et maintenance des locomotives Diesel

- L'expert fait défaut
- Développé par General Electric Company
- Capture des connaissances de l'unique expert
- Actions :

- isole les défauts
- fait des requêtes
- fournit des informations
- guide le réparateur

## H. Autres



### Définition : Autres



## Calcul symbolique

- Conçu au MIT
- Vaste "culture" mathématique
- Développement en 100 a-h : 300000 lignes de code Lisp

Examples :

- résolution d'équations différentielles
- recherche de primitives
- calcul matriciel
- algèbre vectoriel
- résolution de systèmes d'équations,...