Intelligence Artificielle

Plan du cours

- Champ de l'IA
- Historique
- Systèmes Formels
- Langage Prolog : Notions de Base
- Systèmes Experts
- Constraints Satisfaction Problems

Champ de l'IA

Champ de l'Intelligence Artificielle

Peut-on penser la pensée ?

Champ de l'Intelligence Artificielle

Quelques objectifs …

- réagir avec discernement à des situations nouvelles,
- tirer profit de circonstances fortuites,
- discerner le sens de messages ambigus ou contradictoires,
- juger de l'importance relative de différents éléments d'une situation,
- trouver des similitudes entre des situations malgré leurs différences,
- établir des distinctions entre des situations malgré leurs similitudes,
- synthétiser de nouveaux concepts malgré leurs différences,
- trouver de nouvelles idées,

- …….

Champ de l'Intelligence Artificielle

… quelques questions …

• Lorsqu'il formule un nouveau théorème, le mathématicien est-il un découvreur, ou un inventeur ?

• Un théorème est-il démontré lorsque seule la puissance de calcul d'un ordinateur permet de le démonter ? (exemple des premières démonstrations du théorème des quatre couleurs)

• Peut-on concevoir une machine capable de produire mécaniquement tous les livres possibles ? (voir la *Bibliothèque de Babel* de Borges).

• Quel est le rapport entre la forme de symboles (des mots, des phrases, des symboles mathématiques, …) et le sens qu'ils expriment ?

• A-t-on besoin de connaître le sens de symboles pour les manipuler ? (voir la machine à fabriquer des théorèmes de Poincaré).

• Existe-il un critère objectif permettant de décider si un système est ou non intelligent ?

•…

Champ de l'Intelligence Artificielle

… et quelques définitions :

• « *Si l'informatique est la science du traitement de l'information, l'I.A. s'intéresse à tous les cas où ce traitement ne peut être ramené à une méthode simple, précise, algorithmique* » (Laurière 87).

•*L'IA est « l'application de logiciels et de techniques de programmation mettant en lumière les principes de l'intelligence en général, et de la pensée humaine en particulier* » (Boden).

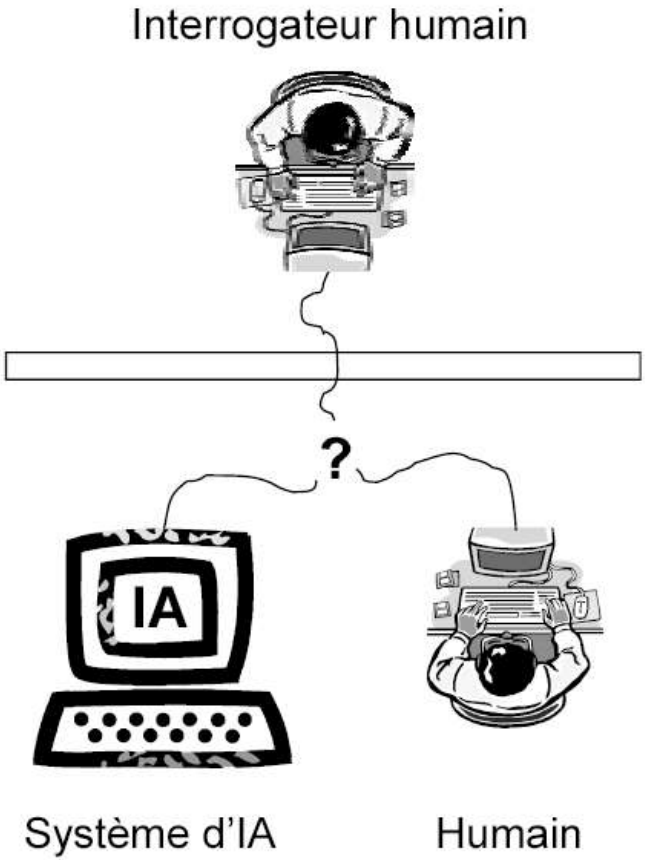
• … « *l'étude de l'intelligence, indépendamment de sa manifestation chez l'homme, l'animal ou la machine* » (McCarthy)

• … « *la poursuite de la métaphysique par d'autres moyens* » ! Longuet-Higgins.

• … « *la science s'intéressant aux machines qui réalisent ce qui, fait par l'homme, nécessiterait de l'intelligence* » (Minsky).

•*"L'intelligence artificielle peut être définie comme la tentative d'obtenir des machines comme celles qu'on voit dans les films." ..(Russell Beale)*

Champ de l'Intelligence Artificielle



Le test de Türing …

Champ de l'Intelligence Artificielle

	Penser comme des humains	Penser rationnellement
Pensée	« The exciting new effort to make computers think … *machines with minds*, in the full and litteral sense » (Haugeland, 1985) « [The automation of] activities that we associate with human thinking, activities sush as decision-making, problem solving, learning … » (Bellman, 1978)	« The study of mental faculties through the use of computational models » (Charniak and McDermott, 1985) « The study of computations that make it possible to perceive, reason, and act » (Winston, 1992)
	Agir comme des humains	**Agir rationnellement**
Action	« The art of creating machines that perform functions that require intelligence when performed by people » (Kurzweil, 1990) « The study of how to make computers do things at witch, at the moment, people are better » (Rich and Knight, 1991)	« Computational Intelligence is the study of the design of intelligent agents » (Poole *et al.*, 1998) « AI … is concerned with intelligent behavior in artifacts » (Nilsson, 1998)
	Empirique	Théorique

Champ de l'Intelligence Artificielle - Break

Deux exemples - problème de la reconnaissance de forme

Pourquoi peut-on lire aisément le paragraphe suivant ?

Sleon une édtue de l'Uvinertisé de Cmabrigde, l'odrre des ltteers dnas un mtos n'a pas d'ipmrotncae, la suele coshe ipmrotnate est que la pmeirère et la drenèire soit à la bnnoe pclae. Le rsete peut êrte dnas un dsérorde ttoal et vuos puoevz tujoruos lrie snas porlblème. C'est prace que le creaveu hmauin ne lit pas chuaqe ltetre elle-mmêe, mias le mot cmome un tuot.

Combien y-a-t-il de "F"dans cette phrase ?

++++++++++++++++++++++++++++
FINISHED FILES ARE THE RE-
SULT OF YEARS OF SCIENTIF-
IC STUDY COMBINED WITH THE
EXPERIENCE OF YEARS
++++++++++++++++++++++++++++

Réponse : non il n'y en a pas 3 mais 6 ! (le cerveau humain a tendance à oublier le « F » de « OF » … .)

Historique

Historique - Quelques dates

• **Jusqu'à la première moitié du XXième siècle :** il s'agit avant tout de construire les bases philosophiques et mathématiques sur lesquelles pourra se développer l'IA.

•**A noter, quelques projets de « machines à penser » , qui sont essentiellement des « machines à calculer »** : projet de machine à calculer de Pascal au XVIIème siècle, projet « d'automate rationnel » de Leibnitz au début du XVIII ème, machine de Babbage au XXième, …

•**Années 1940 / 50 : naissance de l'IA**. Modèles mathématiques de Pitts et MacColloch en 1943; machine de Türing en 1950; théorie de l'information de Shannon,…

•**Années 50 - 60 : essor de l'IA** : conférence de Darmouth en 1956 consacrant le terme d'Intelligence Artificielle; développement des ordinateurs, des langages informatiques de type Lisp, …

Historique - Quelques dates

•**Années 70 : nouveaux modèles de représentation et de traitement des connaissances**. Systèmes experts, création du langage Prolog orienté vers le traitement de la langue naturelle en France au début des années 70, …

•**Années 80 : phase d'industrialisation :** diffusion d'applications industrielles, commercialisation de progiciels, …

• **Depuis les années 90 : retour à des projets plus réalistes** (on parle moins des systèmes experts par ex.). Nouveaux concepts (ex. Agents intelligents), développement des applications liées à la recherche de l'information (parallèlement au développement d'Internet), résurgence des concepts de réseaux neuronaux et d'algorithmes génétiques, …

Historique - Une référence : la machine de Türing

La machine de Türing (années 1940-50) est un automate théorique disposant :

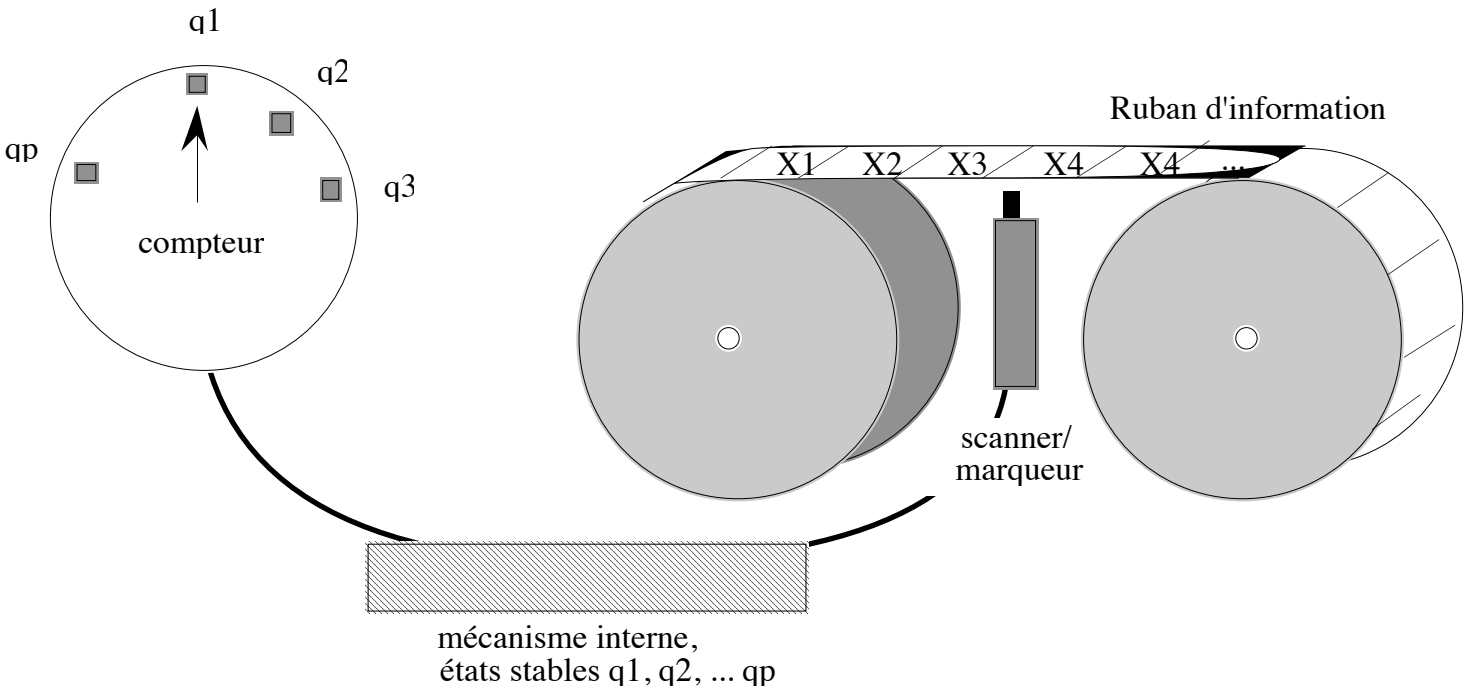
- d'une source d'information, matérialisée par un ruban (théoriquement infini), sur lequel sont imprimés des symboles (X1, X2, ... Xn).
- d'un "scanner-marqueur" capable de lire et d'écrire des symboles sur le ruban,
- d'un mécanisme possédant un nombre fini d'états internes notés q1,q2,...qp.

Ce mécanisme affichera son état courant sur un compteur.

Connaissant l'état interne qi du mécanisme, et le symbole Xj pointé sur la bande par le scanner, la machine pourra effectuer des traitements élémentaires :

- en réécrivant, ou non, un nouveau symbole sur le ruban,
- puis en déroulant, ou non, le ruban d'un cran vers la droite ou vers la gauche,
- et en modifiant, ou non, l'état interne qi du mécanisme.

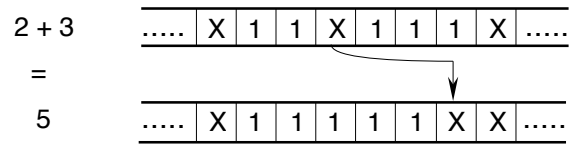
Historique - Une référence : la machine de Türing



Historique - Une référence : la machine de Türing

Exemple de machine de Türing : machine à additionner.

Dans cet exemple, tout nombre sera codé sur le ruban par une série de "1" (3 sera codé "111", 4 par "1111", etc ...), chacun de ces nombres étant délimité par un séparateur "X". Une addition telle que « 2+3=5 » pourra donc êre représentée par :



Pour effectuer cette opération, la machine de Türing doit posséder au moins trois états internes q1, q2, et q3, et appliquer les règles suivantes :

	Situation de départ		Situation à l'étape suivante		
	Etat interne du mécanisme	Symbole lu par le scanner	Réécriture du symbole	Décallage du ruban	Etat interne du mécanisme
1	q1	1	1	gauche	q1
2	q1	X	1	gauche	q2
3	q2	1	1	gauche	q2
4	q2	X	X	droite	q3
5	q3	1	X	stop	q3
6	q3	X	X	stop	q3

Systèmes formels

Systèmes formels - La Bibliothèque de Babel ...

"La Bibliothèque de Babel est une sphère dont le centre véritable est un hexagone quelconque, et dont la circonférence est inaccessible /.../. Il n'y a pas, dans la vaste Bibliothèque, deux livres identiques. De ces prémisses incontournables, il déduisit que la Bibliothèque est totale, et que ses étagères consignent toutes les combinaisons possibles des vingt et quelques symboles orthographiques (nombre, quoique très vaste, non infini), c'est-à-dire tout ce qu'il est possible d'exprimer, dans toutes les langues. Tout : l'histoire minutieuse de l'avenir, les autobiographies des archanges, le catalogue de la Bibliothèque, des milliers et des milliers de catalogues mensongers, la démonstration de la fausseté de ces catalogues, la démonstration de la fausseté du catalogue véritable /.../. »

*J.L. Borges - **La Bibliothèque de Babel** - Fictions - 1941.*

Systèmes formels - Définition

Un système formel est « *un ensemble de données purement abstrait, sans lien avec l'extérieur, qui décrit les règles de manipulation d'un ensemble de symboles traités de façon uniquement syntaxique, c'est-à-dire sans considération de sens (sémantique).*

Il est constitué :

1°/ d'un alphabet fini de symboles;
2°/ d'un procédé de construction des mots du système formel;
3°/ d'un ensemble d'axiomes qui sont des mots;
4°/ d'un ensemble fini de règles de déduction qui permettent de déduire d'un ensemble fini de mots un autre ensemble de mots.

Elles sont de la forme :

U1 et U2 et ... Up ==> W1 et W2 et ... Wn
où les Ui et les Wj sont des mots du système formel.
La flèche "==>" se lit "permet de déduire". »

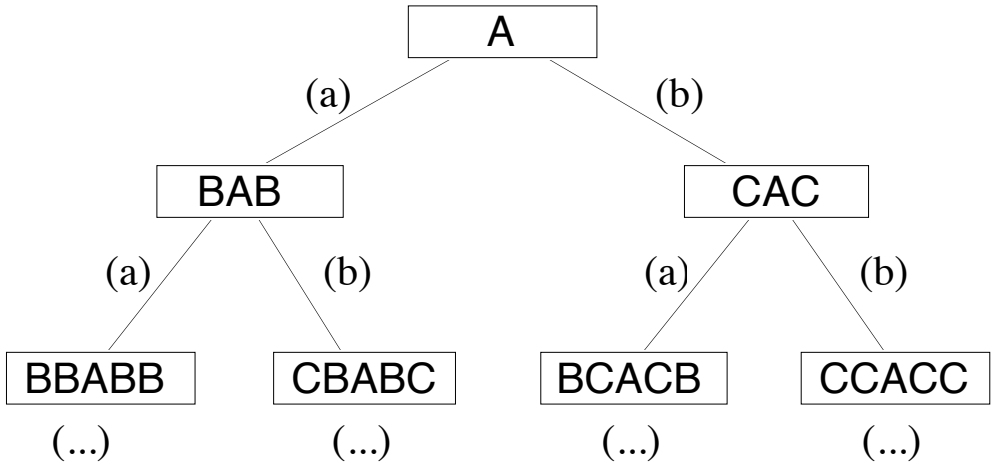
(Laurière 87)

Systèmes formels - Exemple

Exemple du système « BAB »:

1°/ alphabet = les trois symboles A, B et C,
2°/ mots = toute suite finie de symboles de l'alphabet. Par exemple ""(chaîne vide), "A", "AAAAB", "BABBCA", etc ...
3°/ axiome unique : "A"
4°/ règles de déduction : soient n et m deux mots quelconques,
a) mAn ==> BmAnB
b) mAn ==> CmAnC

Ceci peut se traduire par un graphe, aussi appelé *arbre de dérivation* :



Systèmes formels - Décidabilité

On dira qu'un système formel est **décidable** s'il est possible, en un nombre fini d'étapes, de déterminer si un mot quelconque peut être ou non déduit des axiomes du système.

Exemple : le système « BAB » est-il décidable ? Autrement dit, soit un mot donné, par exemple « CCABBAC », peut-on dire s'il appartient, ou non, à l'ensemble des mots produits par le système « BAB » ?

Il existe plusieurs façons de répondre à cette question :

- soit en parcourant l'arbre de dérivation de l'axiome « A » vers les théorèmes, et en vérifiant si « CCABBAC » est un de ces théorèmes. On verra qu'il s'agit là d'une stratégie de recherche dite « en chainage avant ».

- soit en tentant d'appliquer les règles de déduction en sens inverse, pour vérifier s'il est possible, depuis « CCABBAC » de « remonter » jusqu'au théorème « A ». On verra qu'il s'agit d'une stratégie de recherche dite « en chainage arrière ».

- il existe une troisième solution : constater que tous les théorèmes produits par le système « BAB » sont de la forme *au centre la lettre A, et de part et d'autre une combinaison symétrique de B et de C.*

Systèmes formels - Exemple du jeu d'Echecs

Systèmes formels - Exemple du jeu d'Echecs

L'ensemble des parties du jeu d'échecs pourrait ainsi être représenté par le système formel comprenant :

- Un alphabet **:** tout symbole représentant une pièce du jeu positionnée sur l'échiquier (toutes les pièces possibles, sur toutes les cases possibles). Exemple: "Fou Noir en A1", " Cavalier Blanc en B5", etc ...

- Des mots **:** toute combinaison finie de pièces positionnées. Toute configuration possible de l'échiquier peut donc être représentée par un mot (les configurations "absurdes" comprenant par exemple plusieurs pièces sur la même case sont également des mots),

- Un axiome **:** mot représentant la configuration initiale de l'échiquier.

- Des règles de déduction **:** les règles de mouvement des pièces sur l'échiquier. Autrement dit, comment partant d'une configuration du jeu (donc d'un mot) déplacer une pièce (donc créer un autre mot).

Systèmes formels - Exemple du jeu d'Echecs

L'arbre de dérivation présentera **toutes** les parties possibles du jeu, se terminant (extrémité de chaque branche de l'arbre), soit par un « mat », soit par un « pat ».

Or aucune machine n'a une mémoire suffisamment puissante pour mémoriser l'intégralité de cet arbre…

L'automate joueur d'échec doit donc s'*"adapter"* à toute configuration nouvelle de l'échiquier, pour *"inventer"* les réponses les plus appropriées. Il anticipera, dans la limite de sa mémoire, n coups à l'avance, en simulant alternativement

- le mouvement qui lui est le plus favorable, lorsque c'est à lui de jouer,
- le mouvement le plus défavorable, lorsque c'est au tour de l'adversaire

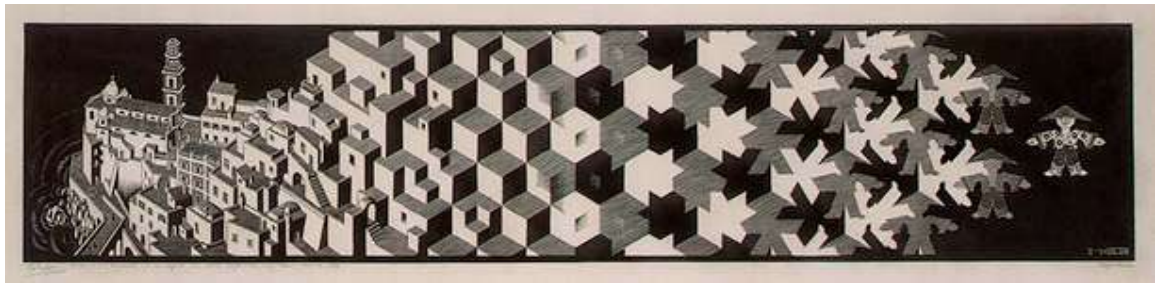
D'où le nom de cette méthode, dite "min-max". Il choisira en définitive la déplacement qui, au nième coup anticipé, est susceptible de l'amener aux situations "globalement les plus favorables".

Pour ***évaluer*** les situations *favorables* ou *défavorables*, autrement dit limiter l'exploration de l'arborescence en éliminant les branches "sans intérêt", l'automate utilisera *des principes sortant du cadre explicite défini par les seules règles du jeu d'échecs, et s'appuyant sur la pratique d'un expert.*

Systèmes formels

« Ainsi, c'est bien entendu, pour démontrer un théorème, il n'est pas nécessaire ni même utile de savoir ce qu'il veut dire. On pourrait remplacer le géomètre par le piano à raisonner imaginé par Stanley Jevons; ou, si l'on aime mieux, on pourrait imaginer une machine ou l'on introduirait les axiomes par un bout pendant qu'on recueillerait les théorèmes à l'autre bout, comme cette machine légendaire de Chicago où les porcs entrent vivants et d'où ils sortent transformés en jambons et en saucisses. Pas plus que ces machines, le mathématicien n'a besoin de comprendre ce qu'il fait. »

Henri Poincaré, ***Science et Méthode,*** *1905.*



Langage Prolog

Langage Prolog - Préambule : un mot de de Lewis Caroll …

Soient les propositions suivantes :

- Les animaux sont toujours mortellement offensés si je ne fais pas attention à eux
- Les seuls animaux qui m'appartiennent se trouvent dans ce pré
- Aucun animal ne peut résoudre une devinette s'il n'a reçu une formation convenable dans une école
- Aucun des animaux qui se trouvent dans ce pré n'est un raton-laveur
- Quand un animal est mortellement offensé, il se met toujours à courir en tout sens et à hurler
- Je ne fais jamais attention à un animal qui ne m'appartient pas
- Aucun animal qui a reçu dans une école une formation convenable ne se met à courir en tout sens et à hurler

Que peut-on déduire de l'énoncé : « **cet animal est un raton laveur** » ?

Réponse :

On peut en déduire que cet animal est incapable de résoudre une devinette.

In Lewis CAROLL, La logique sans peine.

Langage Prolog - Rappel : l'ordre de la logique

- Logique d'ordre 0 :

C'est la logique des propositions.
Par exemple, Distance=384_km représente un et un seul mot insécable.

- Logique d'ordre 0+ :

Elle contient des opérateurs de comparaison (ex. >, <, =, >=, <= et <>), des valeurs comparables, des constantes (par exemple, la constante Distance peut être assignée à la valeur 384 km).

- Logique d'ordre 1 :

C'est la logique du calcul des prédicats.
Définition du prédicat : Expression logique dont la valeur peut être vraie ou fausse selon la valeur des arguments, c'est-à-dire une fonction qui renvoie "vrai" ou "faux". La logique d'ordre 1 contient :

* des variables substituables = variables d'individu,
* des quantificateurs : Pour tout, Quelque soit, ...

Langage Prolog - Rappel : l'ordre de la logique

Exemples de prédicats en logique d'ordre 1 :

- Tout homme est mortel : homme(x) -> mortel(x) pour tout x ;
- Quelque soit x, d(x) < 2 km implique aller_à_pied(x) ;
- On peut aussi utiliser des fonctions : inférieure(distance(x), 2 km) implique aller_à_pied(x).

En logique d'ordre 1, on doit choisir des instances pour les variables substituables : le x de distance(x).

- Logique d'ordre 2 :

C'est la logique des variables de prédicats.

Elle permet d'écrire des méta-règles, c'est-à-dire des règles portant sur des règles.

* Exemple de méta-règle n°1 : Si R1 est plus spécifique que R2, appliquer R1.
* Exemple de méta-règle n°2 : la relation de transitivité :

Quelque soit R {Quelque soit x, y, z (R(x, y) et R(y, z)) implique R(x, z)} implique Transitive(R).

Variable de prédicat : ici, on instancie une règle par une relation.

Langage Prolog - Logique ?

- Cette proposition est fausse (paradoxe d'Epiménide).

- Quel est le plus grand nombre que l'on peut exprimer avec moins de 200 caractères ASCII ? (soit la phrase « le plus grand nombre exprimable avec deux cents caractères, plus un ». Cette phrase fait moins de 200 caractères …).

- Un ensemble auto-inclusif est un ensemble qui se contient lui même. Exemple : l'ensemble des ensembles; ou l'ensemble de tout sauf les éléphants. Un ensemble qui n'est pas auto-inclusif est dit quelconque. Exemple : ensemble de tous les éléphants (en effet, cet ensemble n'est pas lui-même un éléphant, puisque c'est un ensemble !). Question : **L'ensemble de tous les ensembles quelconques est-il quelconque, ou auto-inclusif ?**

- Cette phrase contient quatre fois la consonne "c". Alors :
  Celle-ci contient cinq fois la consonne "c". Euh, pardon :
  Celle-ci contient six fois la consonne "c". !!!

- On annonce au condamné à mort qu'il sera exécuté dans les dix jours qui viennent, mais que le jour de son exécution sera pour lui une surprise. Ce ne pourra être le jour 10, car étant vivant le 9 il devinera que l'exécution est le 10. Ce ne pourra être le jour 9, car étant vivant le 8 il en déduira que ce sera le 9. Etc. Le condamné en déduit qu'il ne peut être exécuté. Il a été exécuté le 3ième jour, et comme il pensait son exécution impossible par le raisonnement précédent, la condition initiale a bien été respectée.

Langage Prolog - Programmation déclarative

Les langages procéduraux traditionnels , « ont en commun d'être de nature "impérative", c'est à dire qu'ils exigent du programmeur, pour résoudre un problème, de définir selon un algorithme connu de lui-même et de préciser étape par étape la méthode de résolution de ce problème», alors qu'avec un langage orienté objets, « une bonne partie de ces opérations, qui peuvent évidemment être très complexes et très longues, est prise en charge par le système, et non plus par le programmeur qui doit, pour ce qui le concerne, programmer en énonçant des connaissances sur son problème; il convient alors de parler d'une programmation "déclarative", où il revient au programmeur de déclarer "de quoi" est fait le problème, plutôt que "comment" le résoudre » (Bihan 87).

Langage Prolog - Généralités

Le langage **Prolog** (**PRO**grammation **LOG**ique) est né en France au début des années 70. Il résulte notamment de recherches dans le domaine de la linguistique.

- Un programme Prolog est constitué de clauses. Celles-ci sont de trois type : **faits, règles et questions.**
- Une relation peut être spécifiée par des faits, en énonçant simplement les n-uplets des objets vérifiant la relation, ou en établissant des règles concernant la relation.
- Une procédure est un ensemble de clauses concernant une même relation

Par exemple, le fait élémentaire : **Pierre achète une voiture**

sera représenté par une clause : **acheter (Pierre,Voiture)**

Qu'on peut généraliser par : **acheter (X , Y)**
X et Y étant des *objets.*

Langage Prolog – Notions de syntaxe Prolog

- Un programme prolog est un ensemble de clauses.
- Chaque clause peut exprimer :

  - un fait élémentaire :
    Ex : pere(pierre,paul)
  - des règles :
    Ex: parent (X,Y) :- pere(X,Y).
    parent (X,Y) :- mere(X,Y).

- Dans l'exemple précédent, la règle « parent » a été définie par deux relations, dont la succession est traitée comme avec un « ou » logique : pour que la règle « parent » soit vérifiée, il faut et il suffit que la première relation soit vérifiée, ou (non exclusif) la seconde.
- Chaque relation se termine par un point « . ».
- Plusieurs conditions, à l'intérieur d'une même clause, sont réparées par une virgule « , », qui a la valeur logique du « et ».
- Les arguments d'une clause sont des individus (des « atomes » : pierre, paul) notés ici en minuscules, ou des variables notées en majuscules représentant un objet quelconque.
- Dans une règle, le symbole « :- » représente le « si » de la logique.
- Lorsque l'interprète prolog est prêt, il affiche « ?- » dans l'attente d'une interrogation.

Exemple :

?- **pere(pierre, X).**	***>question posée après « ?- »***
X=paul	***>réponse de l'interprète Prolog***
yes	***> « oui », il y a une réponse vraie à la question.***

- Pour évaluer une expression arithmétique, on utilisera le prédicat prédéfini « is ».

Exemple :

```
?- X is 2+5*4
X= 22
yes
```

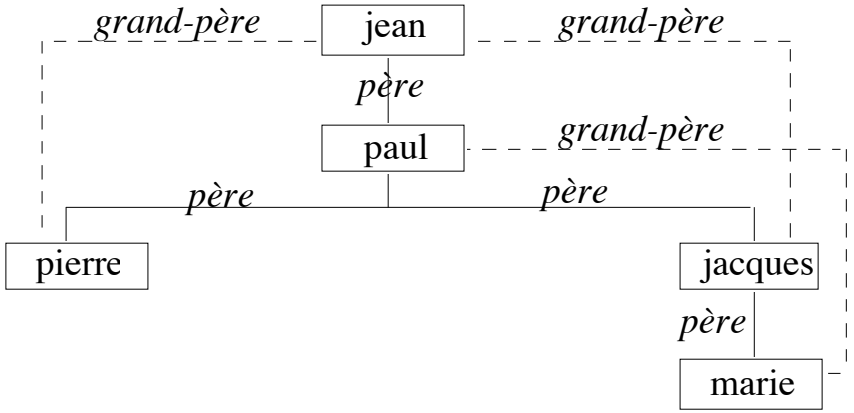

Langage Prolog - Règles

Connaissant, par exemple, les faits élémentaires :

Père (Jean , Paul). (pour "Jean est le père de Paul")
Père (Paul , Pierre).
Père (Paul , Jacques).
Père (Jacques, Marie).

La règle "Grand-Père", permettra de produire (***d'inférer***) de nouveaux faits :

Grand-Père (X , Y) :-
il existe un objet Z avec
Père (X , Z), et
Père (Z , Y) .



Langage Prolog - Questions

Pour l'utilisateur ce codage de l'information présente de nombreux intérêts, notamment celui de pouvoir interroger une "base de connaissances" (qu'on assimilera ici à un ensemble de clauses), aussi bien par des questions "fermées" (appelant des réponses oui/non), que par des questions "ouvertes" à une ou plusieurs inconnues ("trouver les objets pour lesquels cette affirmation est vraie").

Avec la base de faits précédente, l'interrogation :

Père (Jean , Pierre) ? *(i.e. "Jean est-il le père de Pierre ?)*
a pour réponse "faux".

Et l'interrogation :

Grand-Père (Jean , X) ? *(i.e. "Jean est le grand-père de qui ?")*
a pour réponse :
X = Pierre, et
Y = Jacques.

On constate que toutes les "connaissances" sont exprimées de la même façon par des clauses. ***Il n'existe plus de distinction structurelle entre l'information au sens de "process"*** *(celle "qui dit ce qu'il faut faire", le fichier-programme dans un langage traditionnel),* ***et l'information au sens de "data"*** *(celle "sur quoi on travaille", le fichier-données dans un langage traditionnel).*

Langage Prolog - Récursivité

Supposons que l'on souhaite compléter la base de connaissances "père/grand-père" par une clause "ancêtre". Une première solution consisterait à définir explicitement toutes les acceptations du mot *ancêtre* :

```
ancêtre(X,Y) :-
        père(X,Y).      (i.e.: X est l'ancêtre de Y si X est le père de Y ...)
ancêtre(X,Y) :-
        père(X,Z),
        père(Z,Y).      (i.e.: X ancêtre de Y si X grand-père de Y)
ancêtre(X,Y) :-
        père(X,Z),
        père(Z,W),
        père(W,Y).      (i.e. : X ancêtre de Y si X arrière grand-père de Y)
etc ...
```

Cette formulation est insuffisante puisqu'elle renvoie à une infinité de règles…

On utilisera donc plutôt un raisonnement récursif du type :

(a) condition initiale : X ancêtre de Y si X est le père de Y.
(b) condition récursive : X ancêtre de Y si il existe Z tel que
X père de Z et
Z ancêtre de Y.

ou encore:

(a') condition initiale : X ancêtre de Y si X est le père de Y.
(b') condition récursive : X ancêtre de Y si il existe Z tel que
X ancêtre de Z et
Z père de Y.

Langage Prolog - Récursivité

Soit en langage Prolog :

Solution (a) (b) :

```
ancêtre(X,Y) if
        père(X,Y).                  (a)
ancêtre(X,Y) if
        père(X,Z),
        ancêtre(Z,Y).               (b)
```

Solution (a') (b') :

```
ancêtre(X,Y) if
        père(X,Y).                  (a')
ancêtre(X,Y) if
        ancêtre(X,Z),
        père(Z,Y).                  (b')
```


Langage Prolog - Listes

Les *listes* sont utilisées dans Prolog pour manipuler des groupes d'objets. On entendra ici par *liste* un ensemble ordonné d'objets, notés entre crochets et délimités par des virgules.

Exemple :

L = [pierre,paul,jacques].

On notera qu'une liste est *ordonnée*. La liste [pierre,paul,jacques] est donc différente de [jacques,paul,pierre].

On ne dispose que d'un seul opérateur , noté ":", pour travailler sur une liste : il permet d'isoler la *tête de la liste* (son premier élément), de la *queue de la liste* (la liste constituée des éléments restants).

Exemple :

si :	L = [pierre,paul,jacques].	
et :	L = [X:Y],	
alors :	X = pierre	(un élément),
	Y = [paul,jacques]	(une liste).

La liste vide est acceptée, et notée [] .

Langage Prolog - Manipulation de listes

Appartenance à une liste

La clause "appart(X,L)" sera évaluée "vraie" si l'élément X appartient à la liste. Elle sera définie de façon récursive :

(a) condition initiale : X appartient à la liste L si X est la tête de la liste L,
(b) récursion : X appartient à la liste L si X est dans la queue de la liste L.

Ceci se traduit par :

```
appart(X,L) :-
        L=[X:_].            (a)
appart(X,L) :-
        L=[_:L1],
        appart(X,L1)        (b)
```

Dans cet exemple, le symbole "_" est utilisé pour figurer une variable muette, c'est à dire non nécessaire à la suite du traitement. Exemple : dans la condition (a), il n'est pas nécessaire de se préoccuper de la queue de la liste L, dès lors que X est la tête de la liste.

Langage Prolog - Manipulation de listes

On remarquera que la clause "appart" peut être utilisées de deux façons différentes :

- pour vérifier l'appartenance d'un élément à une liste :

>appart(pierre,[paul,pierre,jacques]) ? *(i.e. : pierre est-il dans la liste?)*
>true *(réponse oui)*

- à l'inverse, pour extraire les éléments d'une liste :

>appart(X,[paul,pierre,jaques]) ? *(i.e. : qui est dans la liste ?)*
>true *(réponse oui)*
> X=paul *(justification)*
> X=pierre
> X=jacques

Une question telle que "appart(pierre,L) ?" entraînerait un message d'erreur, puisqu'elle consisterait à demander l'ensemble - infini - des listes contenant l'élément "pierre" ...

Langage Prolog - Manipulation de listes

Concaténation de deux listes :

La clause "concat(L1,L2,L3) sera évaluée vraie si L3 est la concaténation de L1 et L2.
Exemple : concat([pierre,paul],[jacques,marie],[pierre,paul,jacques,marie]) est vraie.

```
concat([],L2,L3) :-
        L2=L3.                  (condition initiale)
concat(L1,L2,L3) if
        L1=[X:L4],
        concat(L4,L2,L5),
        L3=[X:L5].              (récursion)
```

A noter : cette clause pourra remplir plusieurs fonctions :

- vérifier la concaténation de trois listes :

  > concat([pierre,paul],[jacques,marie],[pierre,paul,jacques,marie]) ?

- vérifier l'élément "manquant" d'une concaténation :

  > concat([pierre,marie],L,[pierre,marie,paul]) ?

- extraire toutes les concaténations possibles d'une liste :

  > concat(L1,L2,[pierre,paul]) ?

Langage Prolog - Manipulation de listes

Réunion de deux listes :

Il s'agira ici de modifier "concat" pour obtenir une véritable réunion des deux listes, évitant les répétitions.
Autrement dit, obtenir des réponses telles que :

```
> concat([pierre,paul],[marie,pierre], L) ?        (question)
> true                                             (réponse: oui)
> L = [pierre,paul,marie]                          (justification)
```

La clause "concat" sera modifiée en *ajoutant* une nouvelle condition :

```
concat([],L2,L3) :-
        L2=L3.                      (condition initiale)
concat(L1,L2,L3) :-                 (ignorer les doublons)
        L1=[X:L4],                  (= soit X la tête de L1)
        appart(X,L2],               (= et X déjà dans L2)
        concat(L4,L2,L3).           (= alors poursuivre en ignorant X)
concat(L1,L2,L3) :-
        L1=[X:L4],
        concat(L4,L2,L5),
        L3=[X:L5].                  (récursion)
```

Cette exemple souligne le caractère "additif" d'un langage objets. En effet, pour modifier le comportement de la clause "concat", il a suffit d'*ajouter* une condition intermédiaire (ici, *ignorer les doublons*), *sans modifier* le reste du programme

Langage Prolog - Manipulation de listes

La clause "reverser(L1,L2)" sera évaluée vraie si l'ordre des éléments de L1 est inverse de celui de L2.

Exemple :

```
> renverser([pierre,marie,paul],L) ?      (question)
> true                                    (réponse oui)
> L=[paul,marie,pierre]                   (justification)
```

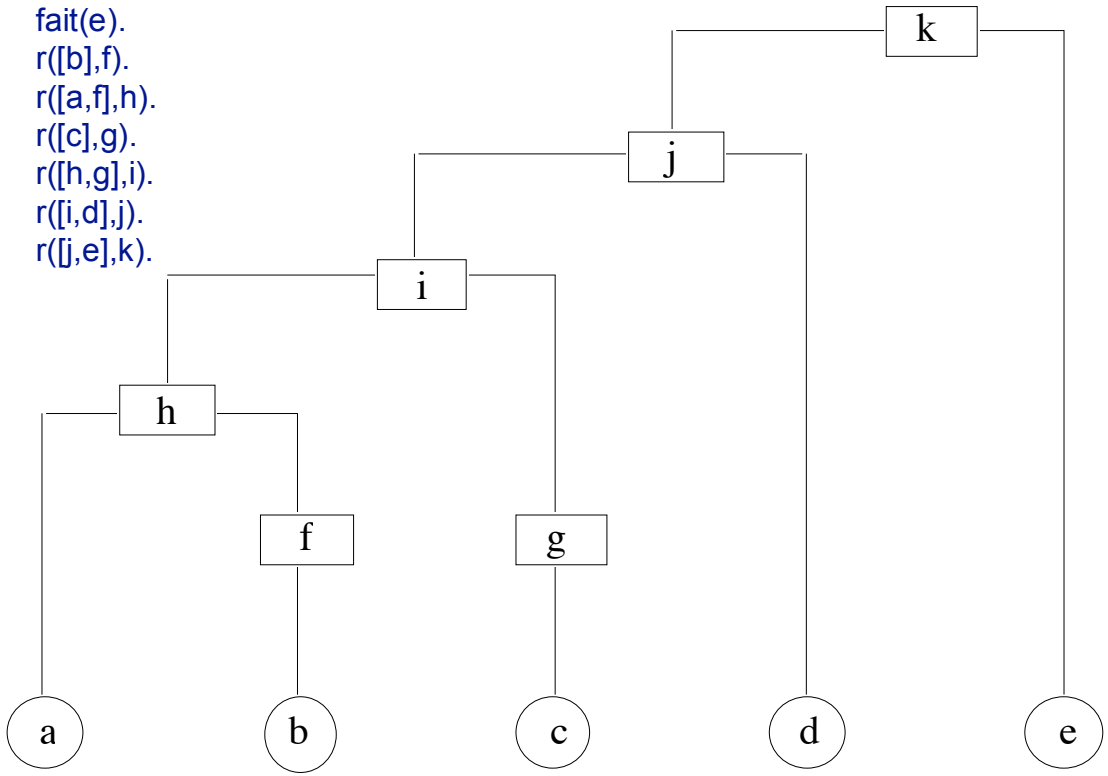
La clause fera appel à "concat" (dans sa première version, sans élimination de doublons) :

```
renverser (L1,L2) :-                      (condition initiale)
        L1=[],                            (= la liste vide renversée
        L2=[].                            est la liste vide ...)
renverser(L1,L2) :-                       (récursion)
        L1=[X:L3],
        renverser(L3,L4),
        concat(L4,[X],L2].
```


Langage Prolog - Stratégies de recherche

Exemple de base de faits :

```
fait(a).
fait(b).
fait(c).
fait(d).
fait(e).
r([b],f).
r([a,f],h).
r([c],g).
r([h,g],i).
r([i,d],j).
r([j,e],k).
```



Stratégies de recherche par chainages avant et arrière :

Stratégie 1 :

```
ar(X) :-          (a/ condition initiale)
    fait(X).
ar(X :-           (b/récursion)
    r(L,X),
    appart(Z,L),
    ar(Z).
```

Stratégie 2 :

```
av(X) :-          (a/ condition initiale)
    fait(X).
av(X) :-          (b/récursion)
    av(Z),
    r(L,X),
    appart(Z,L).
```


Langage Prolog – La coupure

La « coupure » est un prédicat prédéfini permettant d'agir sur le comportement de l'interprète Prolog lors du retour arrière.

Exemple : soit la relation inserer(X,Xs,Ys), où Xs est une liste triée en ordre croissant d'entiers et Ys est la liste obtenue à partir de Xs en insérant l'entier X.

```
inserer(X,[],[X]).                                  (1)
inserer(X,[X:Ys],[Y:Zs]) :- X > Y, inserer(X,Ys,Zs).  (2)
Inserer(X,[Y:Ys],[X,[Y:Ys]]) :- X=<Y.               (3)
```

Pour résoudre un but inserer(X,Xs,Ys), prolog va essayer ces trois clauses suivant leur ordre d'apparition dans le programme. Si la clause (1) est vérifiée (i.e. si Xs est la liste vide et que Ys est la liste composée de l'unique élément X), il est inutile d'essayer les clauses (2) et (3) lors du retour arrière. On peut « couper » ce processus, avec le prédicat « ! ». Idem si la clause(2) est vérifiée, inutile d'examiner la (3).

```
inserer(X,[],[X]) :- !.                             (1)
inserer(X,[X:Ys],[Y:Zs]) :- X > Y,!, inserer(X,Ys,Zs).  (2)
Inserer(X,[Y:Ys],[X,[Y:Ys]]) :- X=<Y.               (3)
```


Langage Prolog - Grammaires formelles

On appellera :

- V le vocabulaire, réunion de deux ensembles disjoints :

  - Vt, le vocabulaire terminal, c'est-à-dire l'ensemble des symboles qui composent une langue (dictionnaire des tous les mots de la langue),
  - Vn, le vocabulaire non-terminal, regroupant l'ensemble des variables, ou catégories syntaxiques, permettant de décrire cette langue.

- un langage sur Vt est un ensemble (éventuellement infini), de chaînes formées par des combinaisons finies de symboles de Vt.

- V* est l'ensemble des toutes les chaînes finies formées en combinant des symboles terminaux. Un langage est donc un sous-ensemble de V*.

- une règle de réécriture (ou règle de production) est, au sens large, une relation entre des chaînes formées par des symboles de V. Par exemple, la décomposition d'une phrase (P) en un groupe nominal (GN) et un Groupe Verbal (GV) s'exprimera par la règle :

  P --> GN+GV.

Langage Prolog - Grammaires formelles

Un exemple d'application : programmation des grammaires formelles

Les **grammaires formelles** ont pour but d'analyser la langue naturelle en modélisant sa structure syntaxique sous forme de système formel.

C'est **Chomsky**, en 1957, qui dans son ouvrage *Syntactic Structures* , propose le premier modèle de grammaire formelle. "La syntaxe est l'étude des principes et des processus selon lesquels les phrases sont construites dans des langues particulières. L'étude syntaxique d'une langue donnée a pour objet la construction d'une grammaire qui peut être considérée comme une sorte de mécanisme qui produit des phrases de la langue soumise à l'analyse /.../. Le résultat final de ces recherches devrait être une théorie des structures linguistiques où les mécanismes descriptifs utilisés dans les grammaires particulières seraient présentés et étudiés de manière abstraite, sans référence spécifique aux langues particulières " (Chomsky 57).

Les modèles linguistiques de Chomsky reposent sur l'hypothèse d'une décomposition possible de toute phrase en éléments plus simples (mots ou groupes de mots), conformément à des règles explicites

Langage Prolog - Grammaires formelles

On distinguera deux types de règles :

- les règles exprimant une relation entre des catégories syntaxiques.
Par exemple : P -->GN+GV.

- **les règles de lexicalisation,** mettant en relation une catégorie syntaxique et un symbole du vocabulaire terminal Vt . Exemple : Nom --> Paul.

R étant l'ensemble des règles de réécriture, et P le symbole "phrase", on définira une grammaire formelle par le quadruplet :

G = (Vn,Vt,R,P).

L'exemple suivant est emprunté à Chomsky. Il décrit une grammaire élémentaire basée sur six règles de réécriture :

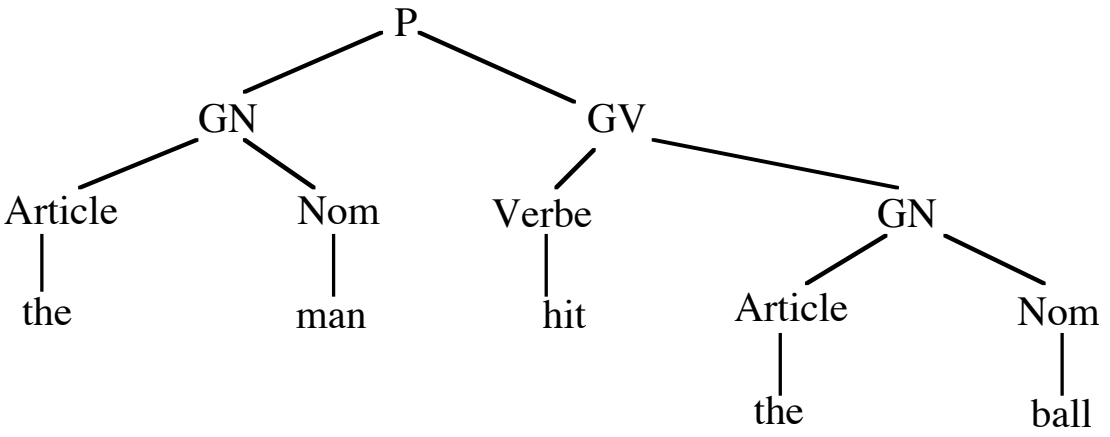
(I)	P	--> GN+GV
(II)	GN	--> Article+Nom
(III)	GV	--> Verbe+GN
(IV)	Article	--> the
(V)	Nom	--> man, ball
(VI)	Verbe	--> hit,took

Langage Prolog - Grammaires formelles

Par applications successives de ces règles, on peut aboutir à la décomposition suivante :

P	
GN+GV	(I)
Art+Nom+GN	(II)
Art+Nom+Verbe+GN	(III)
Art+Nom+Verbe+Article+Nom	(II)
the+Nom+Verbe+the+Nom	(IV)
the+man+Verbe+the+ball	(V)
the+man+hit+the+ball	(VI)

Ceci peut se traduire par un graphe, aussi appelé arbre de dérivation :



Langage Prolog - Grammaires formelles

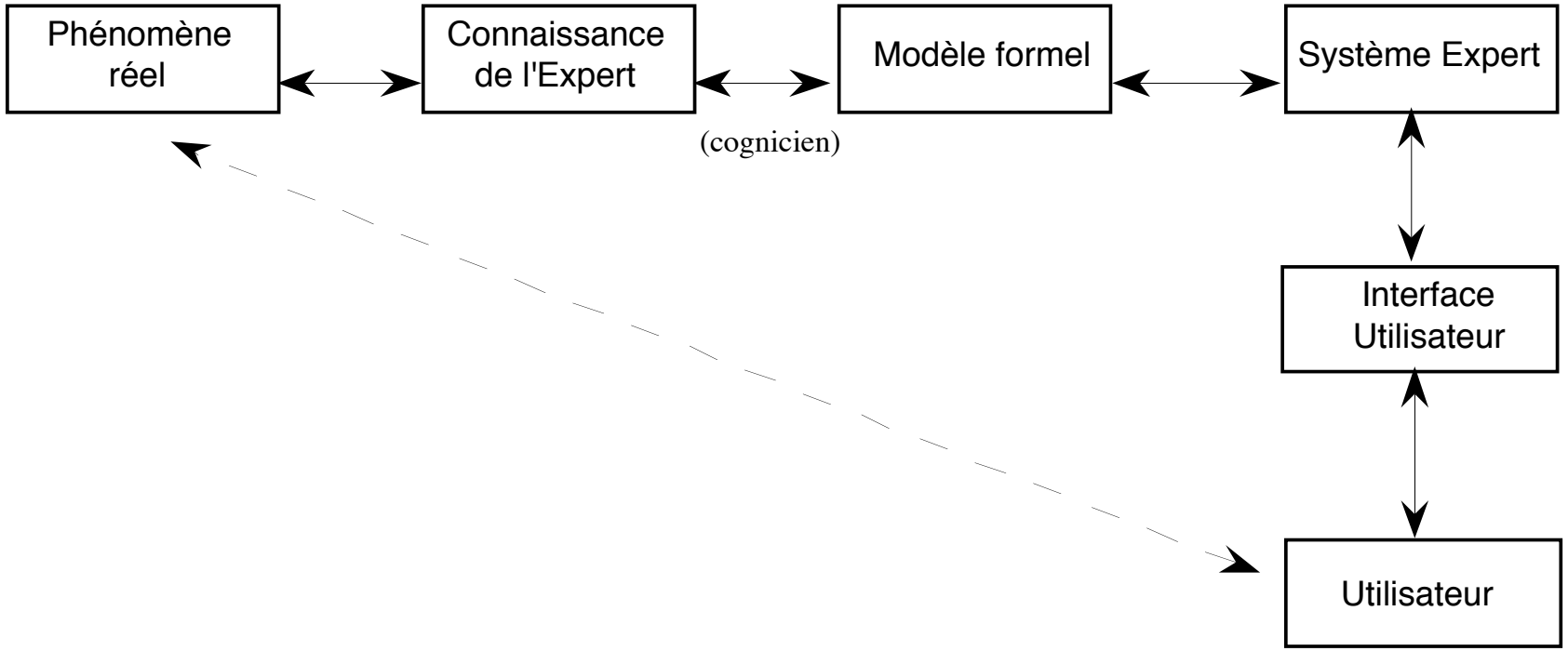
Soit P une phrase (chaîne de caractères) décomposée mot à mot en une liste L. La clause "Phrase(L)" permettra de vérifier si P est ou non une phase générée par le système, aussi appelée "Expressions Bien Formées" ou EBF.

```
Phrase (L) :-
        concat(L1,L2,L)          (L1,L2 sont toutes des
        GN(L1),                  décompositions possibles de L)
        GV(L2).
GN(L) :-
        L=[X1:[X2]],
        Article(X1),
        Nom(X2).
GV(L) :-
        L=[X1:L],
        Verbe(X1),
        GN(L).
Article(the).
Nom(man).
Nom(ball).
Verbe(hit).
Verbe(took).
```

La caractère *additif* d'un langage objets tel que TurboProlog prend ici tout son intérêt : *il suffira d'ajouter de nouvelles clauses (sans modifier les précédentes) pour "apprendre" au programme de nouveaux mots ou de nouvelles règles de grammaire.*

Systèmes Experts

Systèmes Experts - Paradigme du système expert



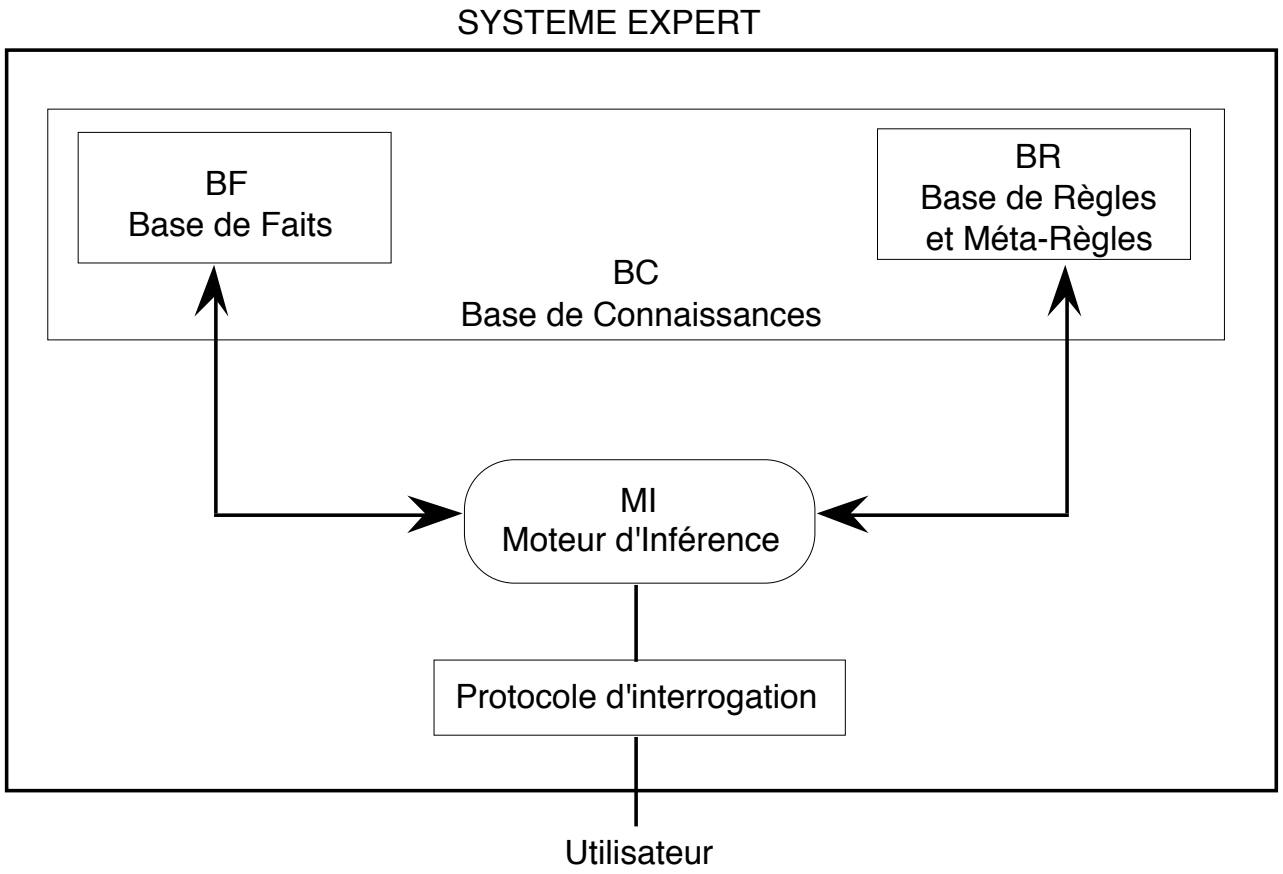
Systèmes Experts - Champ d'application

Les systèmes experts ont pour but de modéliser puis de simuler, dans un logiciel, le savoir - ou le "savoir faire" - d'un expert humain dans un domaine donné.

Leur champ d'application est vaste : il permettront par exemple d'aborder des problèmes pour lesquels:

- il n'existe pas de solution algorithmique connue, possible ou souhaitable,
- les connaissances mises en oeuvre sont de nature intuitive,
- les connaissances mises en oeuvre ne sont pas consignées explicitement par écrit,
- il existe de nettes différences de performance entre un individu moyen et un expert,
- les connaissances mises en oeuvre sont de nature qualitative plutôt que quantitative,
- les connaissances mises en oeuvre sont en évolution rapide et constante,
- la résolution implique des coûts élevés,
- la résolution se fait dans des conditions difficiles, voire stressantes,
- les données sont imprécises, voire incomplètes, ...

Systèmes Experts - Composantes du système expert



Systèmes Experts – Objectifs communes aux SE

Objectif 1 :

Capturer aisément les unités de savoir Faire

Objectif 2 :

Exploiter l'ensemble des unités de Savoir-faire :

- combiner des règles pour inférer des connaissances telles que : jugements, plans, preuves, décisions, prédictions, nouvelles règles, …

- Rendre compte de la manière dont les nouvelles connaissances ont été inférées.

Objectif 3 :

Supporter aisément la révision de l'ensemble des unités de Savoir Faire.

Systèmes Experts - Les composantes

- La base de faits
- La base de règles
- Les métarègles et la métaconnaissance
- La représentation des connaissances incertaines

Systèmes Experts - La Base de connaissance

Initialement, la base de connaissance (BC) contient :

1- des faits avérés»

2- des faits à établir (expression de problèmes ou buts)

3- les connaissances opératoires associées au domaine

Ce sont des règles exprimées sous la forme :

Si :	<condition 1>	Conditions de déclenchement de la règle
	<condition 2> …	
	<condition n>	
Alors :	<conséquence 1>	Corps de la règle
	<conséquence 2> …	
	<conséquence p>	

Systèmes Experts - Exemple

-**Soit la base de connaisance**

-**Base de règles :**

R5 : si Z et L alors S

R1 : si A et N alors E

R3 : si D ou M alors Z

R2 : si A alors M

R4 : si Q at (non W) et (non Z) alors N

R6 : si L et M alors E

R7 : si B et C alors Q

-**Base de faits :**

A

L

Dessiner le Diagramme chainage avant depuis les faits avérés A et L, et de chainage arrière avec but à prouver E.

Systèmes Experts - Structures de contrôle

- Cycle du moteur d'inférence :
  - Phase de d'évaluation :
    - sélection
    - filtrage
    - résolution de conflits
  - Phase d'exécution
- Mode de raisonnements :
  - Chaînage avant (données)
  - Chaînage arrière (but)
  - Chaînage mixte

Systèmes Experts – La phase d'évaluation

La phase de sélection :

Détermine à partir d'un état présent ou passé de la base de faits (BF), et d'un état présent ou passé de la base de règles (BR) :

-un sous-ensemble F1 de BF, et

-un sous-ensemble R1 de BR

qui méritent d'être comparés lors de l'étape de filtrage.

A ce stade, certaines stratégies peuvent être mises en œuvre pour sélectionner de préférence certains faits ou règles plutôt que d'autres (exemple : sélectionner dans F1 les faits déduits les plus récents).

Le filtrage (pattern matching) :

Le moteur d'inférence compare la partie déclencheur de chacune des règles de R1 par rapport à l'ensemble F1 des faits.

Un sous-ensemble R2 de R1 rassemble les règles jugées compatibles avec F1.

R2 est appelé **l'ensemble de conflit.**

Systèmes Experts - La Phase d'évaluation

La résolution de conflits :

Le moteur détermine l'ensemble R3 des règles (sous-ensemble de R2) qui peuvent être effectivement déclenchées.

Si R3 est vide, alors il n'y a pas de phase d'éxécution pour ce cycle.

Au terme de ces différentes étapes de la **phase d'évaluation** (sélection, filtrage, résolution de conflits), est lancée la **phase d'exécution** qui met en œuvre les actions définies par les règles R3.

Systèmes Experts - Types de Systèmes Experts

Haton & Haton (1989) distinguent différents types de systèmes experts :

- **Systèmes d'interprétation de données.**
  - P.ex., systèmes de diagnostic en médecine ("de quelle maladie s'agit-il?"), système d'interprétation géologique ("les mesures seismologiques permettent-elles de croire à l'existence de dépôts minéraux importants?"), systèmes d'évaluation psychologique ("s'agit-il d'un cas suicidaire?"), etc.

- **Systèmes de prédiction.**
  - P.ex., systèmes de prédiction météorologique ("Il pleut aujourd'hui en France. Va-t-il pleuvoir en Suisse demain?"), prédictions géopolitiques ("Les conflits de guerre sont particulièrement fréquents en situation de crise économique. Quelles combinaisons précises de facteurs économiques, sociologiques et politiques prédisent un déclenchement d'hostilités?"), etc.

Systèmes Experts - Types de Systèmes Experts

- **Systèmes de planification.**
  - P.ex., système de réservation de vols aériens, planification des altitudes de vol selon les vents connus et les corridors disponibles, planification des actions d'assemblage d'un robot industriel, planification des interventions requis pour la construction d'un bâtiment, etc.

- **Systèmes de conception.**
  - P.ex., Développement et simplification de circuits intégrés, aménagement d'une cuisine optimale dans un espace donné, clonage de gènes, création d'un nouveau composé chimique, etc.

Constraints Satisfaction Problems

Constraints Satisfaction Problems - Objectifs

La programmation par contrainte (CSP) est à l'interface de l'Intelligence Artificielle et de la Recherche Opérationnelle. Elle s'intéresse aux problèmes définis en termes de contraintes de temps, d'espace, ... ou plus généralement de ressources :

- **les problèmes de planification et ordonnancement** : planifier une production, gérer un trafic ferroviaire, ...

- **les problèmes d'affectation de ressources** : établir un emploi du temps, allouer de l'espace mémoire, du temps cpu par un système d'exploitation, affecter du personnel à des tâches, des entrepôts à des marchandises, ...

- **les problèmes d'optimisation**: optimiser des placements financiers, des découpes de bois, des routages de réseaux de télécommunication, ...

Ces problèmes ont la particularité commune d'être fortement combinatoires: il faut envisager un grand nombre de combinaisons avant de trouver une solution. La programmation par contraintes est un ensemble de méthodes et algorithmes qui tentent de résoudre ces problèmes de la façon la plus efficace possible.

Constraints Satisfaction Problems - Définition

Un réseau de contraintes à domaines finis R = {X,D, C} est défini par :

– *un ensemble de* **variables :**

$X = \{x_1, \ldots, x_n\}$,

– *un ensemble de* **domaines** *finis :*

$D = \{D_1, \ldots, D_n\}$ où D_i est l'ensemble des valeurs pouvant être affectées à la variable x_i; on le note également $D(x_i)$,

– *un ensemble de* **contraintes :**

$C = \{C_1, \ldots, C_m\}$. Chaque contrainte Ci est définie sur un sous-ensemble de variables $var(C_i) = (x_{i1}, \ldots, x_{ik})$ de X par un sous-ensemble $rel(C_i)$ du produit cartésien $D_{i1} x \ldots x D_{ik}$ qui spécifie les combinaisons autorisées de valeurs pour les variables $\{x_{i1}, \ldots, x_{ik}\}$.

Constraints Satisfaction Problems - Vocabulaire

- Chaque variable xi a un domaine non vide de valeurs possibles.
- Un Etat est une affectation de valeurs pour quelques unes ou toutes les variables.
- **Une affectation est consistante** s'il y a aucune violation de contrainte.
- **Une affectation est complète** si toutes les variables ont une valeur.
- **Une Solution** est une affectation Complète et Consistante.

Constraints Satisfaction Problems - Variables, contraintes

Types de variables :

- **Variables discrètes**
  – *Domaines finis* : nombre de variables *n, booléens.*
  – Domaines infinis : entiers, chaînes de caractères, etc…
  Ex: Ordonnancement de tâches; les variables sont les jours de début et de fin des tâches.
- **Variables continues**
  Ex: temps (mesure précise du temps de début et de fin d'une tâche), données mesurables, ...

Types de contraintes : Une contrainte est caractérisée par son *arité*, c'est-à-dire le nombre de variables qu'elle implique,

- **Unaire:** Les contraintes ne concernent qu'une variable.
- **Binaire:** Les contraintes concernent deux variables.
- **Multiple** : Les contraintes concernent 3 variables ou plus.
- **Contraintes de préférence :** ex. , pour la colorisation d'une carte, contrainte du type « préférer le rouge au bleu »…

Constraints Satisfaction Problems - Backtrack

L'algorithme de recherche de solution le plus simple est celui du Backtrack : les variables du problème sont instanciées avec les valeurs des domaines, dans un ordre prédéfini, jusqu'à ce que l'un de ces choix ne satisfasse pas une contrainte. Dans ce cas, on doit remettre en cause la dernière instanciation réalisée. Une nouvelle valeur est essayée pour la dernière variable instanciée, que l'on appelle la variable courante.

Si toutes les valeurs du domaine de cette variable on été testées sans succès, on doit procéder à un backtrack : on choisit une autre valeur pour la variable précédant immédiatement la variable courante. On répète ce processus jusqu'à obtenir une solution, c'est à dire une instanciation de toutes les variables. Si on a parcouru tout l'arbre de recherchesans la trouver, alors on a prouvé que le problème n'a pas de solution.

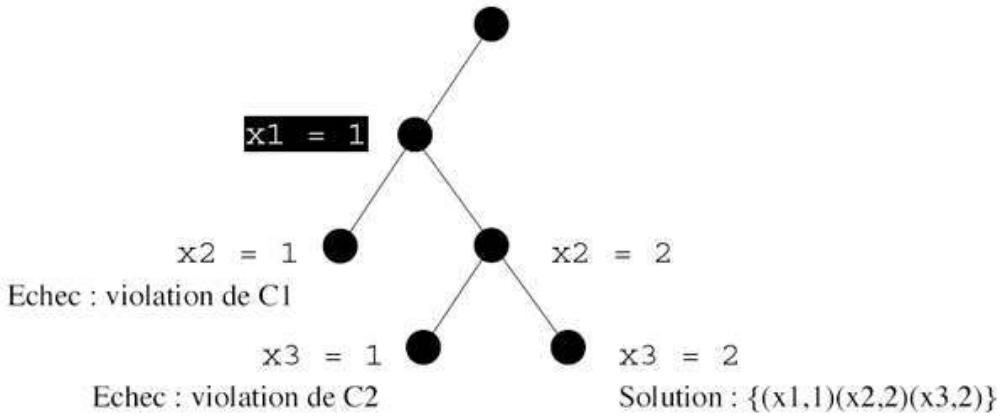
Exemple :

– soient x1, x2 et x3 trois variables,

– soient D(x1) = D(x2) = D(x3) = {1, 2, 3} leurs domaines respectifs.

– On pose les contraintes suivantes:
C1 = [x1 < x2] et C2 = [x2 = x3].

– On suppose que l'on instancie les variables dans l'ordre croissant des indices, en choisissant la plus petite valeur d'abord.
x1 = 1



Arbre de recherche

Constraints Satisfaction Problems - Filtrage

Dans le but de **réduire la taille de l'arbre de recherche**, une méthode de résolution spécifique est associée à chaque contrainte : son **algorithme de filtrage**. Cet algorithme vise à supprimer les valeurs des domaines des variables impliquées dans cette contrainte qui, compte tenu des autres domaines, ne peuvent appartenir à une solution du sous-problème défini par la contrainte. Ces suppressions évitent de parcourir des branches de l'arbre qui ne peuvent aboutir à une solution.

En d'autres termes elle permettent de **réduire l'espace de recherche**. Effectuer un filtrage efficace est une condition nécessaire à la résolution d'applications.

Exemple :

– soient x1 et x2 deux variables,
– soient D(x1) = D(x2) = {1, 2, 3} leurs domaines respectifs,
– soit la contrainte C = [x1 < x2].
La valeur 3 peut être supprimée de D(x1), car il n'existe aucune valeur du domaine de x2 telle que C soit satisfaite si on instancie x1 avec 3 (et idem pour la valeur x2 : la valeur 1 peut être supprimée).

Constraints Satisfaction Problems - Propagation

Après chaque modification du domaine d'une variable il est nécessaire d'étudier à nouveau l'ensemble des contraintes impliquant cette variable, car la modification peut conduire à de nouvelles déductions.

C'est ce que l'on appelle la propagation.

Exemple :

– *soient* $x1$, $x2$ *et* $x3$ *trois variables,*
– *soient* $D(x1) = D(x2) = D(x3) = \{1, 2, 3\}$ *leurs domaines respectifs,*
– *soient les contraintes* $C1 = [x1 < x2]$ *et* $C2 = [x2 = x3]$.

Le filtrage de la valeur 1 *de* $D(x2)$ *relatif à* $C1$ *peut être propagée sur* $D(x3)$*: si la valeur* 1 *n'appartient plus à* $D(x2)$*, alors la valeur* 1 *peut également être supprimée de* $D(x3)$*, car il n'existe plus de solution de* $C2$ *telle que* $x3$ *soit instanciée avec* 1.

Constraints Satisfaction Problems - Heuristiques

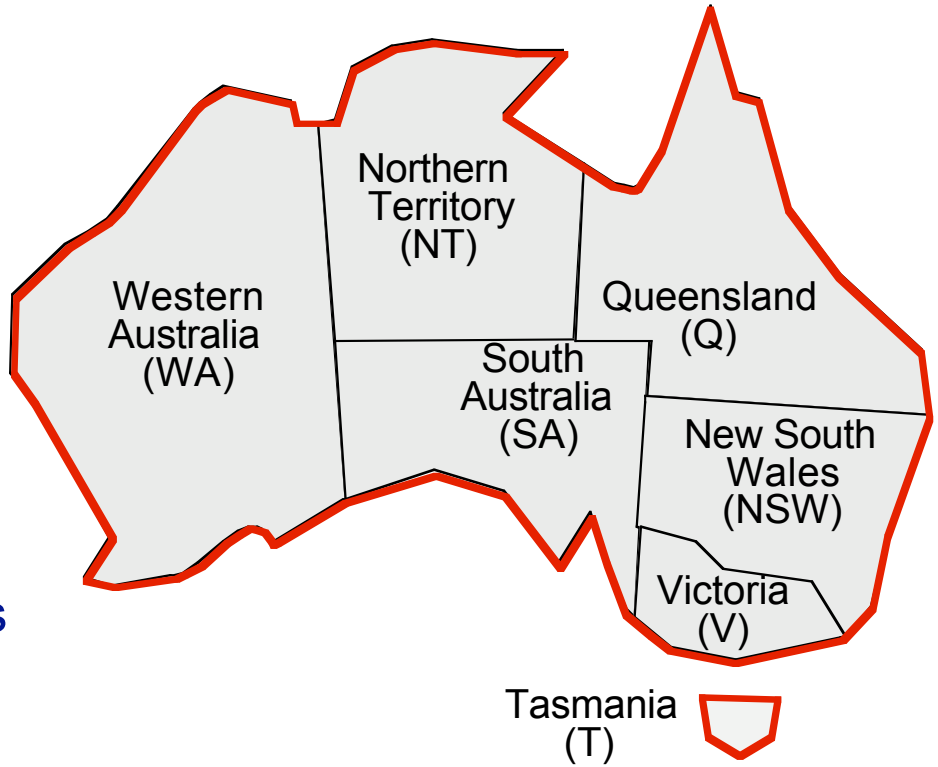
Les méthodes heuristiques permettent de simplifier les recherche:

- **Choix des variables:**
  - **Heuristique du nombre de valeurs restantes minimum** (minimum remaining values (MRV)).
    Choisir la variable avec le moins de valeurs possibles.
  - **Heuristique du degré**
    Choisir la variable présente dans le plus de contraintes.
- **Choix des valeurs:**
  - **Heuristiques des valeurs les moins contraignantes** (least-constraining value)
    Choisir la valeur qui va enlever le moins de choix pour les variables voisines.

Constraints Satisfaction Problems - Exemple

Coloration de carte :

- **Variables :** WA, NT, SA, Q, NSW, V, T
- **Domaines :** Di={rouge, vert, bleu}
- **Contraintes :** Les régions adjacentes doivent avoir des couleurs différentes

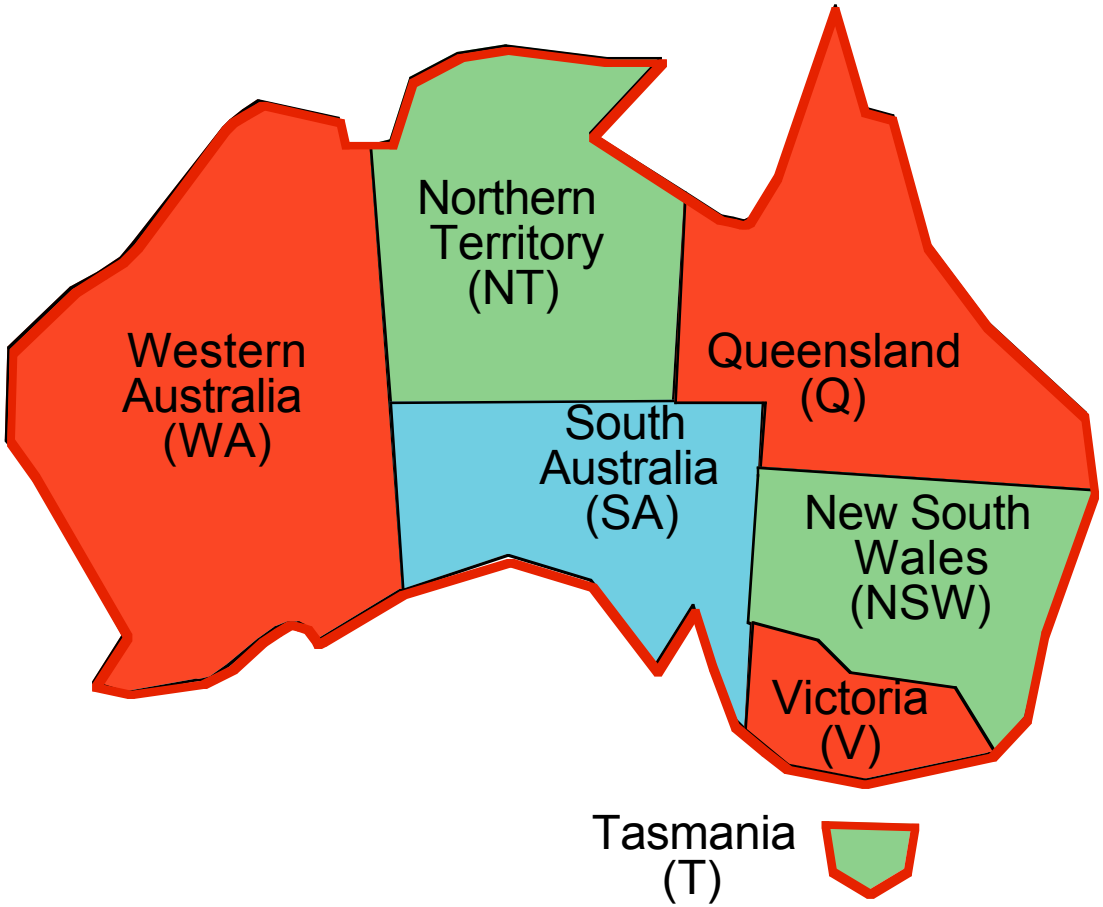


D'après S.Paquet 2003

Constraints Satisfaction Problems - Coloration de carte

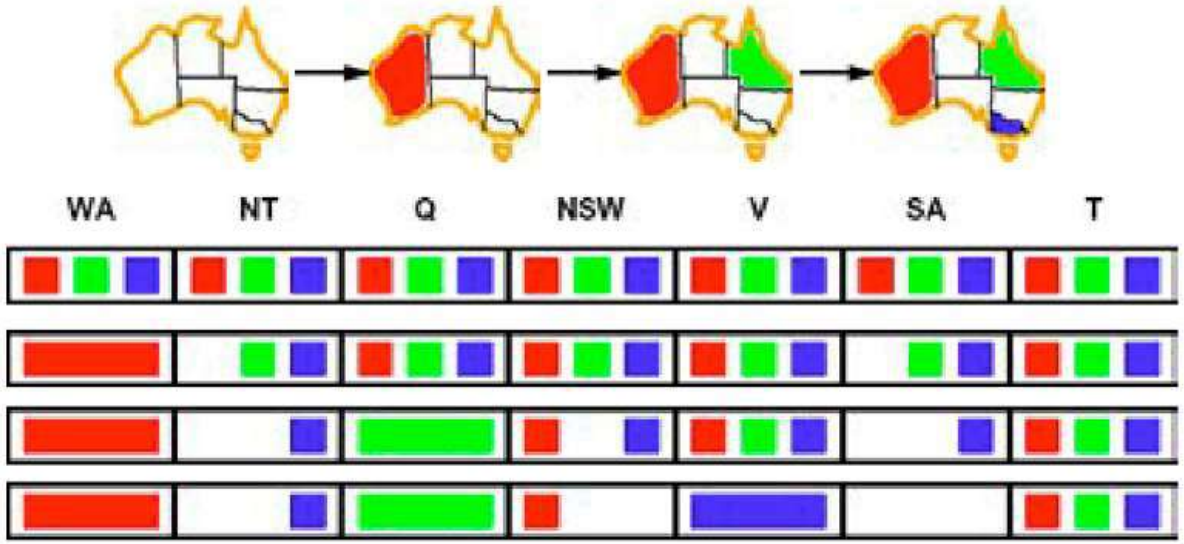
Exemple de solution
Satisfaisant à toutes
Les contraintes :

{WA=rouge, NT=vert,
Q=rouge, SA=bleu,
NSW=vert, V=rouge,
T=vert}

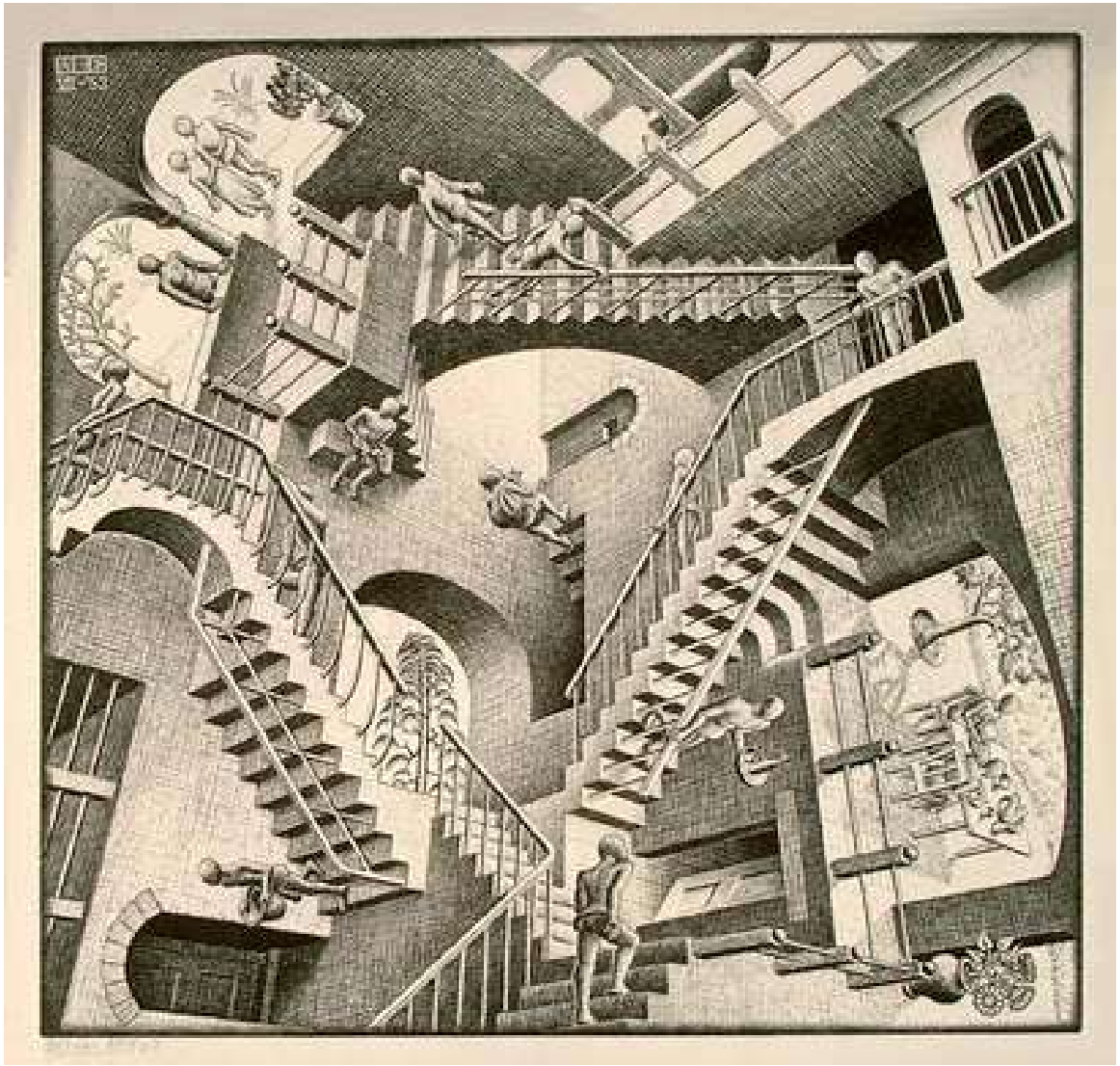


Constraints Satisfaction Problems - Forward Checking

Le ***forward checking*** est une stratégie "avant", qui avant d'affecter une valeur *v* à une variable, vérifie que *v* est compatible avec les variables *suivantes*, c'est-à-dire qu'il existe au moins une valeur pour chaque variable suivante qui soit consistante avec *v* (contrairement au *retour arrière*, qui vérifie que la valeur de la variable courante est compatible avec les valeurs affectées aux variables *précédentes*).



Conclusion ...



Exemples ...

Réaliser un programme prolog modélisant un grammaire formelle permettant de produire des phases avec propositions relatives, telles que :

« l'homme qui a vu l'homme »

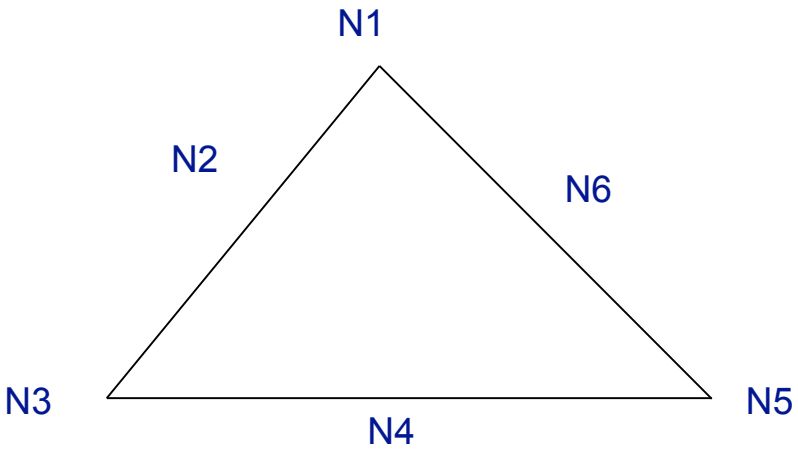
« l'homme qui a vu l'homme qui a vu l'homme »

« l'homme qui a vu l'homme qui a vu l'homme qui a vu l'homme », etc …

- Définir les éléments du système formel
- Formaliser l'arbre de dérivation
- Ecrire le programme en prolog

Nombres en triangle

On dispose les nombres 1 à 6 en triangle, en n'utilisant qu'une fois chaque nombre :



Trouver toutes les manières de placer les nombres sur le triangle de telle sorte que la somme des trois nombres figurant sur un coté soit la même pour les trois cotés du triangle.

Nombres en triangle

La clause « choisir » :

choisir (X,[X:Xs], Xs).

choisir (X,[Y,Xs],[Y:Zs]) :- choisir (X,Xs,Zs)

La relation « choisir (X,Xs,Ys) consiste à choisir un éléments X dans Xs, Ys est alors la liste obtenue à partir de Xs quand on ôte l'élément X.

La première clause correspond au cas où l'élément choisi est le premier de la liste, la deuxième au cas où l'élément choisi est dans la queue de la liste.

Nombres en triangle

```
choisir (X,[X:Xs], Xs).
choisir (X,[Y,Xs],[Y:Zs]) :- choisir (X,Xs,Zs)
solution([N1,N2,N3,N4,N5,N6]) :-
        choisir(N1,[1,2,3,4,5,6],D1),
        choisir(N2,D1,D2),
        choisir(N3,D2,D3),
        S is N1+N2+N3,
        choisir(N4,D3,D4),
        N5 is S – N3 – N4,
        choisir(N5,D4,D5),
        N6 is S-N1-N5,
        choisir(N6,D5,_).
```

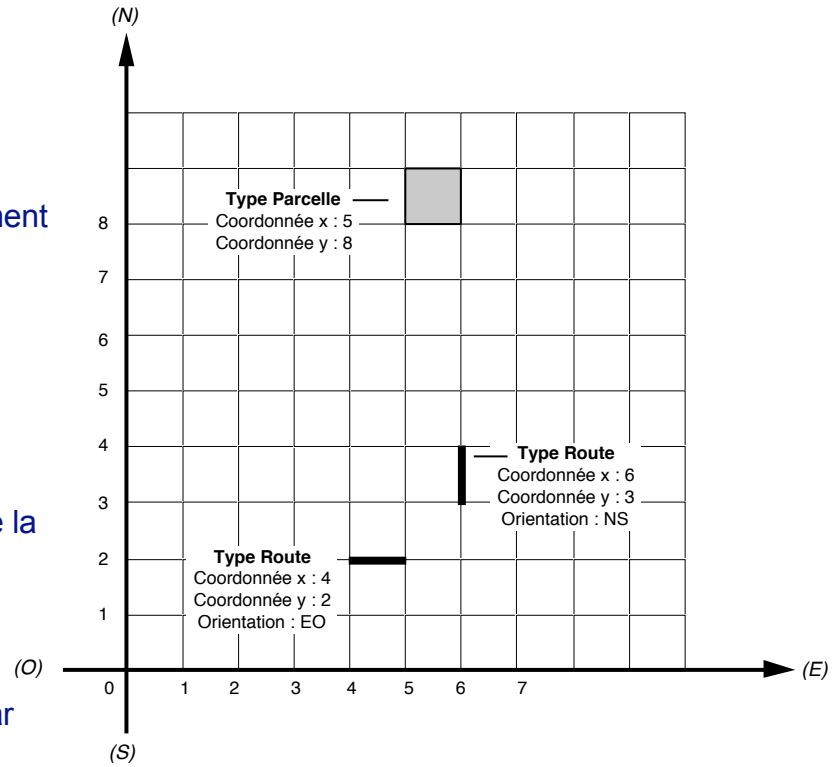

Exemple de système expert pour la résolution d'un problème d'aménagement

-Le système comprend :

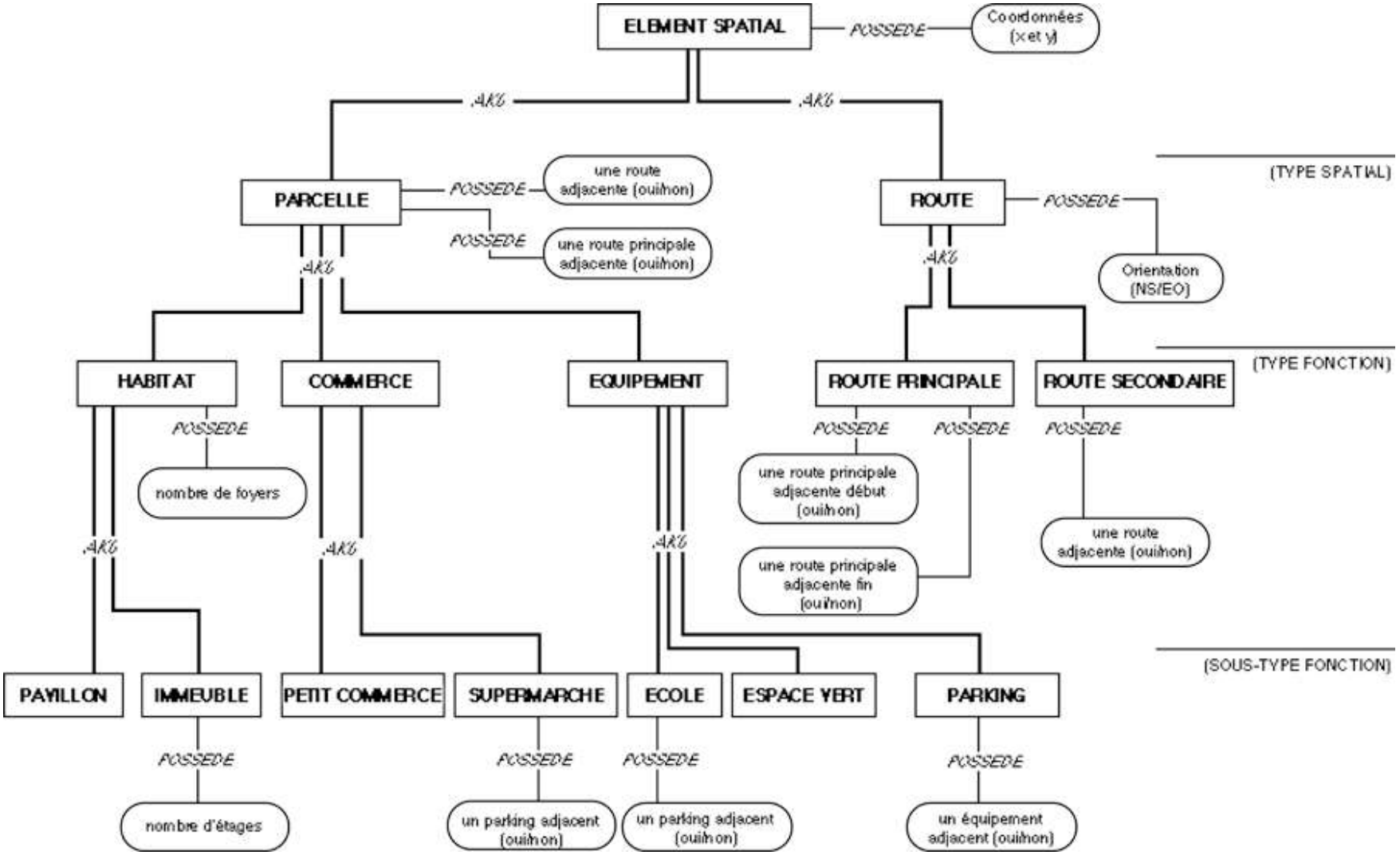
- une *structure générique* décomposant tout élément spatial en (cf. diagramme) :
  - Type Spatial (Parcelle ou Route),
  - Type Fonctionnel (Habitat, Commerce, Équipement, etc ...)
  - Sous-Type Fonctionnel (Pavillon, Immeuble, École, Espace vert, etc ...)

- des *objets instanciés* calquées sur le modèle de la *structure générique.*

- Les lettres A,B,C,D, ... représentent des variables *objets instanciés*.
- Toute valeur relative à un objet instancié A est représentée par son nom dans la structure générique suivi de "(A)".

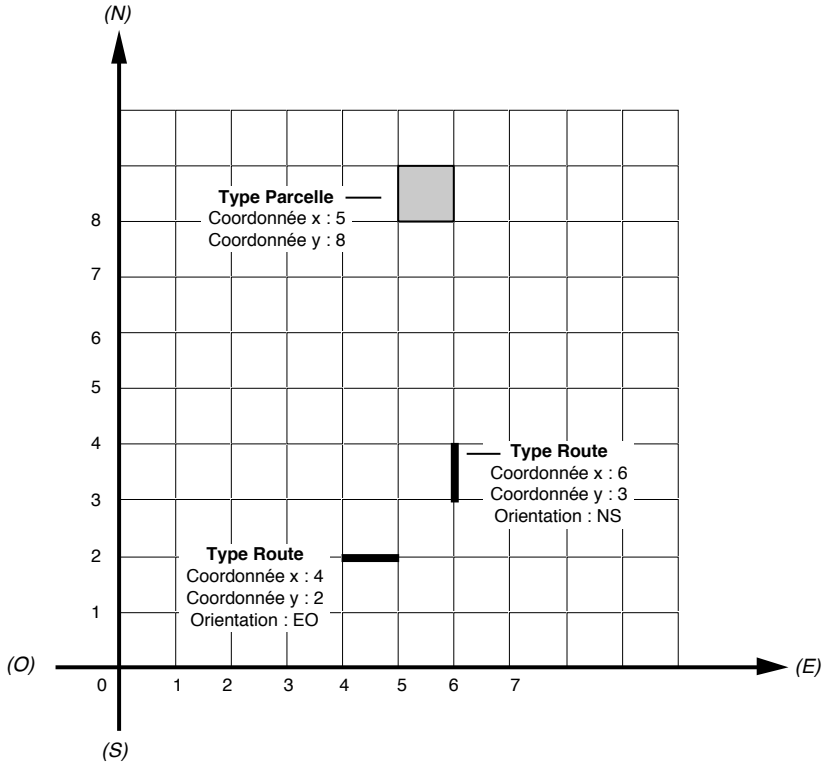


Coordonnées d'un élément spatial


ELEMENT SPATIAL
POSSEDE
Coordonnées (x et y)
AKO
AKO
PARCELLE
POSSEDE
une route adjacente (oui/non)
POSSEDE
une route principale adjacente (oui/non)
ROUTE
POSSEDE
Orientation (NS/EO)
(TYPE SPATIAL)
AKO
AKO
HABITAT
COMMERCE
EQUIPEMENT
ROUTE PRINCIPALE
ROUTE SECONDAIRE
(TYPE FONCTION)
POSSEDE
nombre de foyers
POSSEDE
POSSEDE
une route principale adjacente début (oui/non)
une route principale adjacente fin (oui/non)
POSSEDE
une route adjacente (oui/non)
AKO
AKO
AKO
PAVILLON
IMMEUBLE
PETIT COMMERCE
SUPERMARCHE
ECOLE
ESPACE VERT
PARKING
(SOUS-TYPE FONCTION)
POSSEDE
nombre d'étages
POSSEDE
un parking adjacent (oui/non)
POSSEDE
un parking adjacent (oui/non)
POSSEDE
un équipement adjacent (oui/non)

Exemple de notation :
L'objet A="Immeuble de dix étages localisé en (3,4)" sera décrit dans la base de faits par:
ELEMENT_SPATIAL-COORDONNEE_X (A)= 3
ELEMENT_SPATIAL-COORDONNEE_Y (A)= 4
TYPE_SPATIAL (A) = PARCELLE
TYPE_FONCTIONNEL (A) = HABITAT
SOUS_TYPE_FONCTIONNEL (A) = IMMEUBLE
IMMEUBLE-NOMBRE_ETAGES (A) = 10

Remarque :
Si la seule information "IMMEUBLE-NOMBRE_ETAGES (A) = 10" était rentrée dans la base de fait, un "démon" serait activé pour en déduire :
SOUS_TYPE_FONCTIONNEL (A) = IMMEUBLE
TYPE_FONCTIONNEL (A) = HABITAT
TYPE_SPATIAL (A) = PARCELLE



Coordonnées d'un élément spatial

Toute Règle du système expert est de la forme :

RÈGLE NUMÉRO (numéro de la règle)
SI (condition 1),
(condition 2),
(condition 3),
...
ALORS
(conséquence 1),
(conséquence 2),
(conséquence 3),
...
FIN DE RÈGLE

La règle ne sera activée que si *toutes* les *conditions* sont remplies (ces conditions sont donc reliées implicitement par l'opérateur logique "ET"). *Toutes* les conséquences seront alors réalisées.

Les *conséquences* affectent de nouvelles valeurs aux variables (ou créent ces variables si elles ne sont pas encore définies pour l'objet considéré), avec l'opérateur "<=" .

Exemples :

TYPE_FONCTIONNEL (A) <= HABITAT (l'objet A a pour type fonctionnel HABITAT)
IMMEUBLE-NOMBRE_ETAGES (A) <= 6 (l'objet A est un immeuble de six étages)
Le système admettra également deux autres *conséquences* particulières :
CRÉER_FAIT (A) : crée (comme son nom l'indique), un nouveau fait A dans la base de faits,
FIN RECHERCHE : stoppe le processus de recherche (but atteint)

EXEMPLE DE BASE DE CONNAISSANCE :

BASE DE FAITS :

Il existe déjà un immeuble de dix étages en coordonnées (3,4) :
IMMEUBLE_NOMBRE_ETAGES (Élément1) = 10
ELEMENT_SPATIAL-COORDONNEE_X (Élément1)= 3
ELEMENT_SPATIAL-COORDONNEE_Y (Élément1)= 4

Il existe déjà une école en coordonnées (20,16). :
SOUS-TYPE_FONCTION (Élément2) = ÉCOLE
ELEMENT_SPATIAL-COORDONNEE_X (Élément2)= 20
ELEMENT_SPATIAL-COORDONNEE_Y (Élément2)= 16

EXEMPLE DE BASE DE CONNAISSANCE :

BASE DE REGLES :

Les règles expriment les principes à respecter dans l'aménagement des éléments spatiaux:

- principe (1) : toute parcelle doit être à proximité d'une route (principale ou secondaire), la créer si elle n'existe pas.
- principe (2) : toute habitation doit être à moins de 3 Km d'un commerce, le créer s'il n'existe pas.
- principe (3) : tout supermarché doit être à proximité d'un parking. Le créer s'il n'existe pas et qu'il existe une parcelle libre à proximité. S'il n'existe pas de parcelle libre, changer la localisation du supermarché.
- principe (4) : tout supermarché doit avoir au moins une route principale adjacente.
- principe (5) : toute route doit avoir une route principale ou secondaire adjacente.
- principe (6) : toute route principale doit avoir une route principale adjacente en début et en fin (les routes principales sont toujours continues),
- principe (7) : toute habitation doit être à moins de deux Km d'une école.
- etc ...
- principe (n) : la recherche est terminée lorsque tous les principes précédents sont respectés, et que toutes les parcelles sont occupées.

Exemple de traduction (partielle) du principe (1) :

Cette règle permet, si la parcelle n'a pas de route adjacente, d'en créer une par défaut sur sa frontière sud.

RÈGLE NUMÉRO 1 :

SI PARCELLE_ROUTE_ADJACENTE (A) = NON
ALORS CREER_FAIT (B),
TYPE_SPATIAL(B) = ROUTE
ELEMENT_SPATIAL-COORDONNEE_X(B)<=ELEMENT_SPATIAL-COORDONNEE_V(A)
ELEMENT_SPATIAL-COORDONNEE_Y(B)<=ELEMENT_SPATIAL-COORDONNEE_Y (A)
ROUTE_ORIENTATION (B) <= EO
FIN DE RÈGLE

Exemple de traduction (partielle) du principe (3) :
Cette règle permet, de créer un parking au nord d'un supermarché si aucun parking n'est déjà à proximité du supermarché .

RÈGLE NUMÉRO 2 :
SI SOUS-TYPE_FONCTIONNEL (A) = SUPERMARCHÉ
(traduction : soit A un supermarché)
SOUS-TYPE_FONCTIONNEL (B) = PARKING
ELEMENT_SPATIAL-COORDONNEE_X(B) = CONNU
ELEMENT_SPATIAL-COORDONNEE_Y(B) = CONNU
(traduction : soit un parking B dont les coordonnées sont connues)
ELEMENT_SPATIAL-COORDONNEE_X(B) <> ELEMENT_SPATIAL-COORDONNEE_X(A)
ELEMENT_SPATIAL-COORDONNEE_Y(B) <> ELEMENT_SPATIAL-COORDONNEE_Y(A) +1
(traduction : le parking B n'est pas au nord du supermarché)
ELEMENT_SPATIAL-COORDONNEE_X(B) <> ELEMENT_SPATIAL-COORDONNEE_X(A)
ELEMENT_SPATIAL-COORDONNEE_Y(B) <> ELEMENT_SPATIAL-COORDONNEE_Y(A) +1
(traduction : le parking B n'est pas à l'est du supermarché)
ELEMENT_SPATIAL-COORDONNEE_X(B) <> ELEMENT_SPATIAL-COORDONNEE_X(A) -1
ELEMENT_SPATIAL-COORDONNEE_Y(B) <> ELEMENT_SPATIAL-COORDONNEE_Y(A)
(traduction : le parking B n'est pas au sud du supermarché)
ELEMENT_SPATIAL-COORDONNEE_X(B) <> ELEMENT_SPATIAL-COORDONNEE_X(A)
ELEMENT_SPATIAL-COORDONNEE_Y(B) <> ELEMENT_SPATIAL-COORDONNEE_Y(A) -1
(traduction : le parking B n'est pas à l'ouest du supermarché)
NON (EXISTE_PARCELLE (ELEMENT_SPATIAL-COORDONNEE_X(A) ,

ELEMENT_SPATIAL-COORDONNEE_Y(A))+1
(traduction : la parcelle au nord du supermarché est libre)
ALORS CREER FAIT (C)
SOUS-TYPE_FONCTION (C) <= PARKING
ELEMENT_SPATIAL-COORDONNEE_X(C) <= ELEMENT_SPATIAL-COORDONNEE_X(A)
ELEMENT_SPATIAL-COORDONNEE_Y(C) <= ELEMENT_SPATIAL-COORDONNEE_Y(A)+1
FIN DE RÈGLE

•Concaténer deux listes :

```
concat([],L2,L3) :- L2=L3.
concat(L1,L2,L3) if
        L1=[X:L4],
        concat(L4,L2,L5),
        L3=[X:L5].
```

•Insérer un élément dans une liste :

Clause inserer (X,L2,L3), où X est inséré dans la liste triée en ordre croissant L2 pour obtenir L3.

```
inserer(X,[],[X]).
inserer(X,[X:Ys],[Y:Zs]) :- X > Y,
inserer(X,Ys,Zs).Inserer(X,[Y:Ys],[X,[Y:Ys]]) :-
X=<Y.
```


Concaténer deux listes :

```
appart(X,L) :-
                    L=[X:_].          (a)
appart(X,L) :-
                    L=[_:L1],
                    appart(X,L1)      (b)
```


Réunir deux listes :

```
concat([],L2,L3) :-
                    L2=L3.                  (condition initiale)
concat(L1,L2,L3) :-                         (ignorer les doublons)
                    L1=[X:L4],              (= soit X la tête de L1)
                    appart(X,L2],           (= et X déjà dans L2)
                    concat(L4,L2,L3).       (= alors poursuivre en ignorant X)
concat(L1,L2,L3) :-
                    L1=[X:L4],
                    concat(L4,L2,L5),
                    L3=[X:L5].
```


Renverser une liste :

```
renverser (L1,L2) :-                    (condition initiale)
                    L1=[],              (= la liste vide renversée
                    L2=[].              est la liste vide ...)
renverser(L1,L2) :-                     (récursion)
                    L1=[X:L3],
                    renverser(L3,L4),
                    concat(L4,[X],L2].
```


Problème du singe et de la banane …

Un singe se trouve à la porte d'une pièce. Il souhaite attraper une banane pendue au plafond au centre de la pièce. Il ne peut attraper la banane directement lorsqu'il est au sol, et ne peut le faire qu'en montant sur une boite. Il peut aller chercher cette boite ailleurs dans la pièce.

Comment modéliser ce problème ?

Problème du singe et de la banane …

Les éléments du système :

- position du singe dans la pièce,
- position de la boite dans la pièce,
- le singe est-il au sol ou sur la boite ?
- le singe a-t-il ou non la banane ?

Formalisation des états du système :

Etat (X1,X2,X3,X4)

X1 : position du singe dans la pièce (à la porte, à la fenêtre, etc …)
X2 : le singe est-il au sol ou sur la boite ? (sur-le-sol, sur-la-boite)
X3 : position de la boite dans la pièce (à la porte, à la fenêtre,etc …).
X4 : le singe a-t-il ou non la banane (possede, ne-possede-pas)

L'objectif est : etat(_,_,_,possede)

Les actions possibles :

•Aggriper la banane
•Monter sur la boite
•Pousser la boite
•se déplacer

Problème du singe et de la banane …

La relation prolog deplacement exprime toutes les modifications possibles de l'état du système :

deplacement(Etat1, M, Etat2)

Etat1 : état avant le déplacement

M : mouvement,

Etat2 : état après le déplacement

Problème du singe et de la banane …

Les mouvements autorisés :

deplacement(
etat(aucentre,surlaboite,aucentre,napas),
aggriper,
etat(aucentre,surlaboite,aucentre,possede)).

deplacement(etat(P,surlesol,P,H),
grimper,
etat(P,surlaboite,P,H).

deplacement(etat(P1,surlesol,P1,H),
pousser(P1,P2),
etat(P2,surlesol,P2,H).

deplacement(etat(P1,surlesol,B,H),
marcher(P1,P2),
etat(P2,surlesol,B,H).

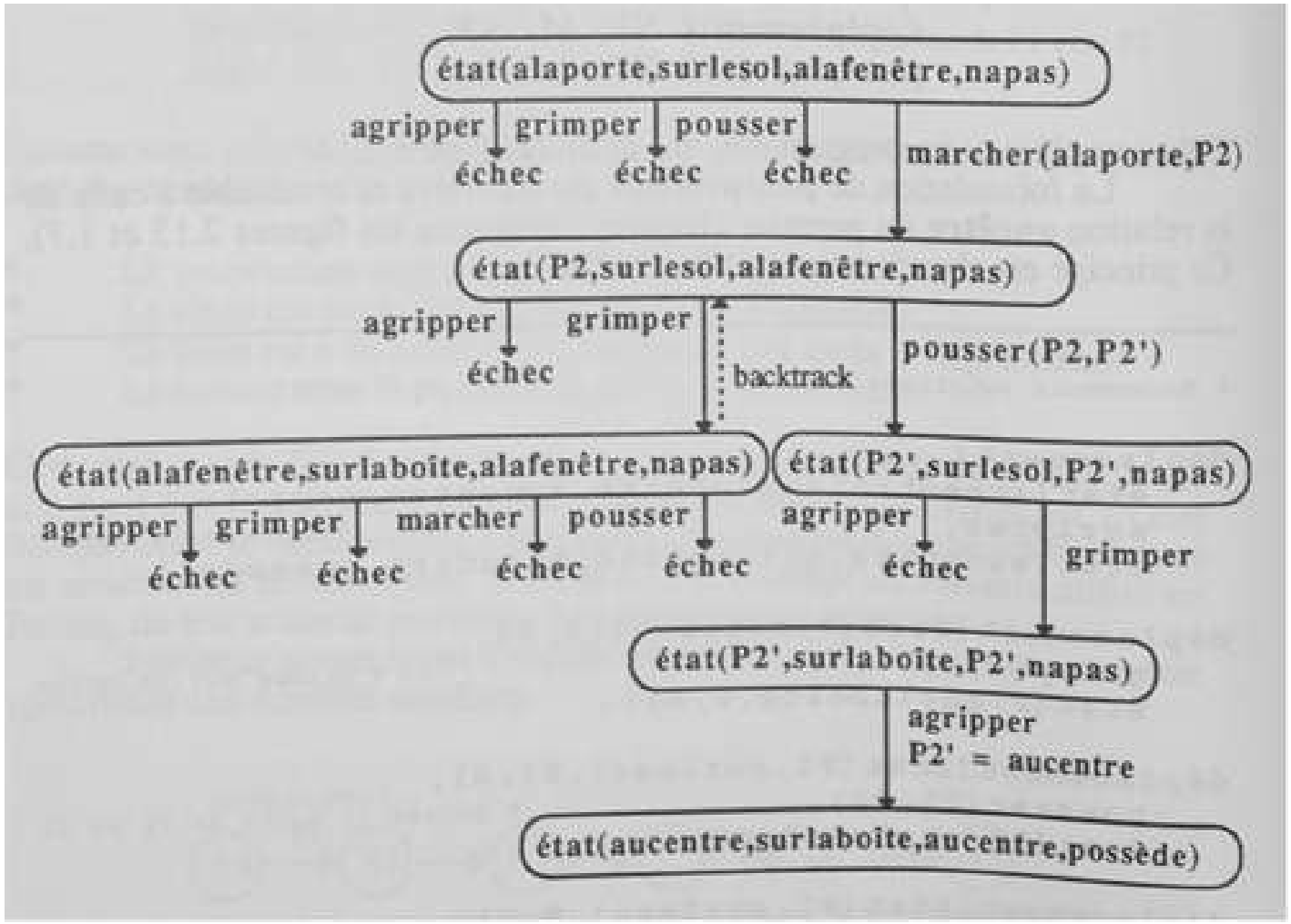
Problème du singe et de la banane …

Principe du programme du problème du singe et la banane :

```
deplacement(
etat(aucentre,surlaboite,aucentre,napas),
aggriper,
etat(aucentre,surlaboite,aucentre,possede)).

deplacement(etat(P,surlesol,P,H),
grimper,
etat(P,surlaboite,P,H).

deplacement(etat(P1,surlesol,P1,H),
pousser(P1,P2),
etat(P2,surlesol,P2,H).

deplacement(etat(P1,surlesol,B,H),
marcher(P1,P2),
etat(P2,surlesol,B,H).
```

```
peutprendre(etat(_,_,_,possede)).          (le singe a la banane)

peutprendre(Etat1) :-                      (il faut agir)
peplacement(Etat1,Déplacement, Etat2),     (action)
peutprendre(Etat2).                        (on prend).
```


Problème du singe et de la banane …



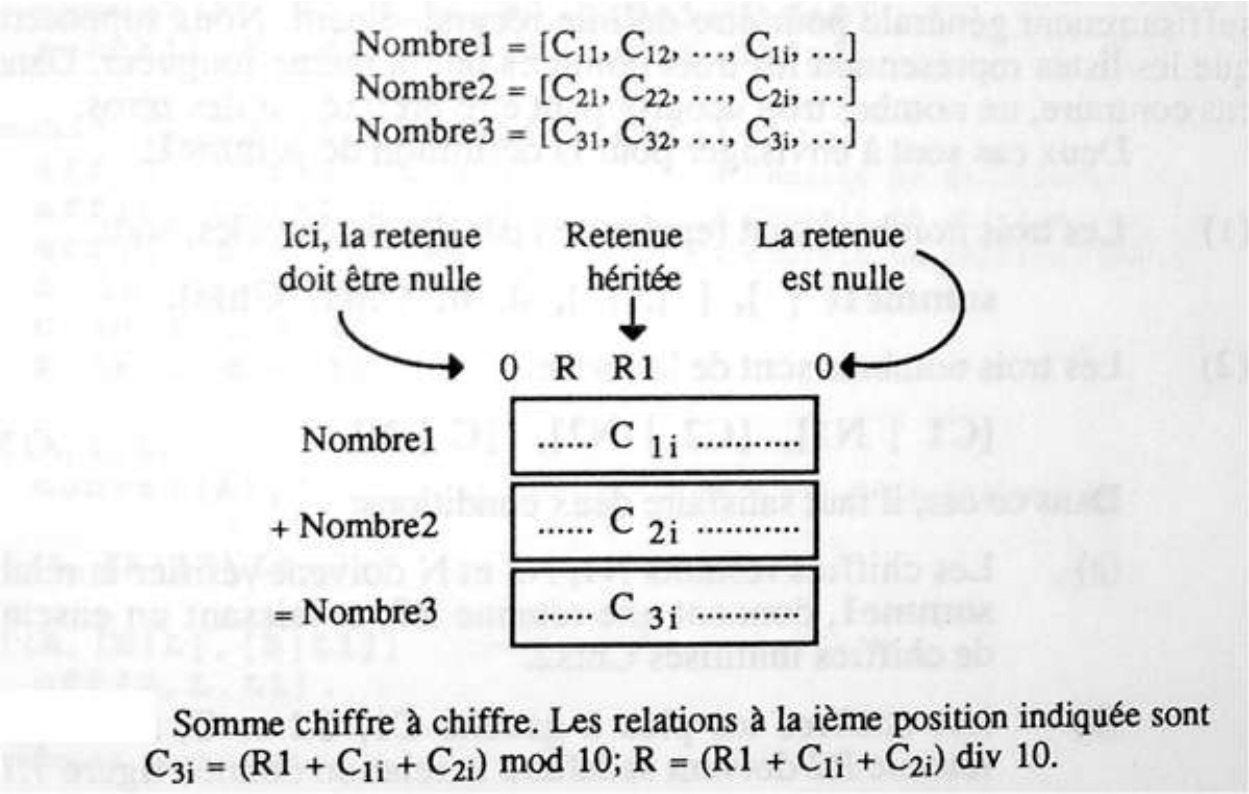
```
  DONALD
+GERARD
-------
=ROBERT
```

Question : comment affecter un chiffre à chaque lettre D,O,N, etc .. de telle sorte que l'addition soit valide ?

(des lettres différentes auront des chiffres différents).

Créer une relation somme(N1,N2,N), où N1,N2,N représentent les trois nombres, avec N=N1+N2.

Somme([D,O,N,A,L,D],[G,E,R,A,R,D],[R,O,B,E,R,T]).



Somme chiffre à chiffre. Les relations à la ième position indiquée sont $C_{3i} = (R1 + C_{1i} + C_{2i}) \bmod 10$; $R = (R1 + C_{1i} + C_{2i}) \text{ div } 10$.

Création de la relation somme1 :

Somme1(N1,N2,N,R1,R,Chiffre1, Chiffres)

N1,N2 et N sont les nombres provenant de somme.
R1 la retenur provennat de la droite (avant addition de N1 et N2),
R la retenue propagée après adition.
Chiffre1 la liste des chiffres disponibles pour instancier les variables de N1,N2 et N
Chiffres est la liste des chiffres non utilisés.

Exemple :

?- somme1([H,E],[6,E],[U,S],1,1,[1,3,4,7,8,9],Chiffres).

H=8
E=3
S=7
U=4
Chiffres=[1,9]
yes

Deux cas sont à envisager pour la définition de somme1 :

(1) Les trois nombres sont représentés par des listes vides, soit :

Somme1([ ],[ ],[ ],0,0,Chfs,Chfs)

(2) Les trois nombres sont de la forme :

[C1:N1],[C2:N2],[C:N]

Dans ce cas, il faut satisfaire deux conditions :

(a) Le chiffres restants N1,N2, et N doivent vérifier la relation somme1, donnant une retenue R2, et laissant un ensemble de chiffres inutilisés Chfs2.

(b) (b) Les chiffres les plus à gauche C1,C2 et C, ainsi que la retenue R2 doivent satisfaire la relation donnée précédemment (slide prec.) : C est le résultat de l'addition de R2 , C1 et C2, qui produit aussi une retenue. La relation somchif aura en charge de vérifier cette condition.

Soit en prolog :

```
Somme1([C1:N1],[C2:N2],[D:N], R1,R,Chfs1,Chfs):-
        somme1(N1,N2,N,R1,R2,Chfs1,Chfs2),
        somchif(C1,C2,R2,C,R,Chfs2,Chfs).
```


```
% Résolution de casse-tête cryptarithmétiques

somme(N1,N2,N)   :-                    % Nombres sous forme de listes
    somme1(N1,N2,N,                    % de chiffres
           0,0,                        % Retenues: héritée, propagée
           [0,1,2,3,4,5,6,7,8,9],_).   % Chiffres disponibles

somme1([],[],[],0,0,Chiffres,Chiffres).

somme1([C1|N1],[C2|N2],[C|N],R1,R,Chfs1,Chfs)   :-
    somme1(N1,N2,N,R1,R2,Chfs1,Chfs2),
    somchif(C1,C2,R2,C,R,Chfs2,Chfs).

somchif(C1,C2,R1,C,R,Chfs1,Chfs)   :-
    eff(C1,Chfs1,Chfs2),           % Choisit un chiffre pour C1
    eff(C2,Chfs2,Chfs3),           % Choisit un chiffre pour C2
    eff(C,Chfs3,Chfs),             % Choisit un chiffre pour C
    S is C1+C2+R1,
    C is S mod 10,
    R is S div 10.

eff(A,L,L)  :-
    nonvar(A),!.                   % A est déjà instanciée

eff(A,[A|L],L).

eff(A,[B|L],[B|L1])   :-
    eff(A,L,L1).
```


Tri de listes – première solution

Créer la relation Tri(Liste, Liste Triée)

-Trouver dans Liste deux éléments adjacents X et Y, tels que X>Y, échanger X et Y, pour donner Liste1, puis trier Liste1.

- S'il n'y a dans Liste aucun couple d'éléments X,Y adjacents tels que X>Y, alors Liste est trié.

```
tribulle(Liste,Triée) :-
        echange(Liste,Liste1),          (échange util dans la liste ?)
        tribulle(Liste1,Triée).
tribulle(triée,triée).                  (non, alors elle est triée)
echange([X,Y:Reste],[Y,X:Reste]:-       (échange 2 premiers éléments)
        X>Y.
echange([Z:Reste],[Z:R1]):-             (échange les éléments dans queue).
        echange(Reste,R1]).
```


Tri de listes – seconde solution

Tri par insertion :

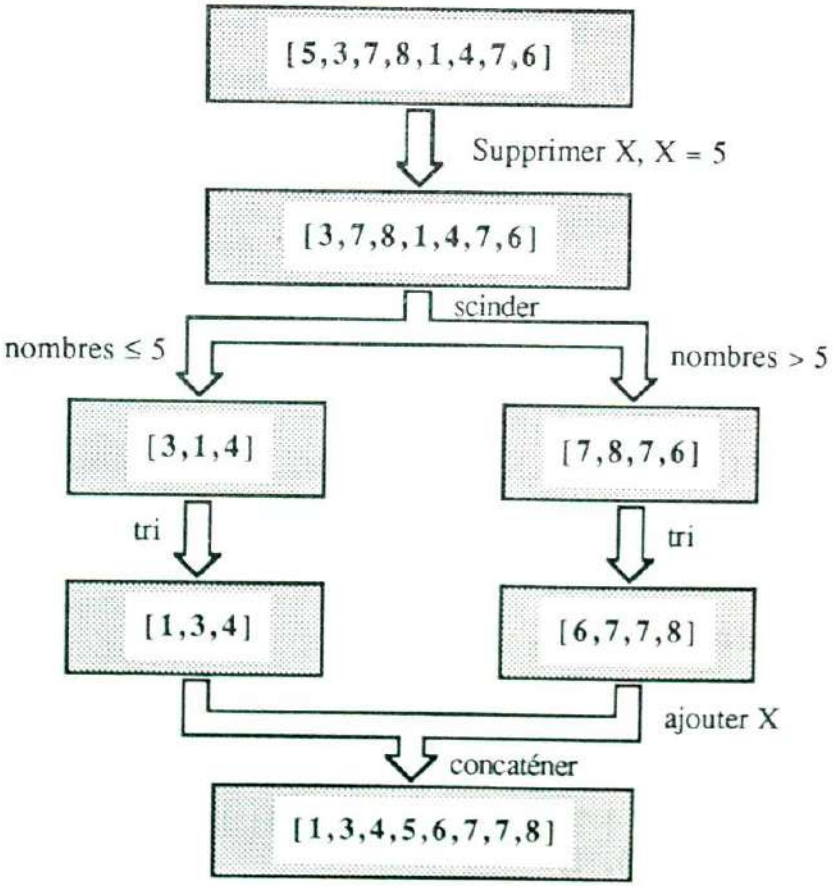
Pour trier L=[X:Q]

(1) : il faut trier Q, la queue de L,

(2) : il faur insérer X dans Q triée, à un emplacement tel que la liste résultante soit triée.

```
tri_insere([],[]).

tri_insere([X:Queue],Triée) :-
        tri_insere(Queue,QueueTriée),        (trie la queue)
        insere(X,QueueTriée,Triée).          (Insère X correctement).

insere(X,[Y:triée],[Y:triée]) :-
        X>Y,

insere(X,triée,triée1).

insere(X,Triée,[X:triée]).
```


Tri de listes – Troisième solution



Tri de listes – Troisième solution

```
trirapide([],[]).

trirapide([X|Reste],Triée)   :-
    scinde(X,Reste,Petite,Grande),
    trirapide(Petite,PetiteTriée),
    trirapide(Grande,GrandeTriée),
    conc(PetiteTriée,[X|GrandeTriée],Triée).

scinde(X,[],[],[]).

scinde(X,[Y|Reste],[Y|Petite],Grande)   :-
    pg(X,Y),!,
    scinde(X,Reste,Petite,Grande).

scinde(X,[Y|Reste],Petite,[Y|Grande])   :-
    scinde(X,Reste,Petite,Grande).

conc([],L,L).

conc([X|L1],L2,[X|L3])   :-  conc(L1,L2,L3).
```


Eliminer les doublons d'une liste.

Soit la clause : doublon(L1,L2), avec L1 la liste avec des doublons, et L2 la liste sans doublon.

Principe :

(1) Une liste avec un seul élément n'a pas de doublon (condition d'arrêt).

(2) Soit une liste L. Isoler sa tête X de sa queue Lq.

- si X appartient à la liste Lq, renvoyer la liste Lquper la t^te).
- Si X n'appartient pas à la queue, renvoyer la liste complète (garder la tête).

Soit en prolog (voir précédement la programmation de la clause appart) :

```
doublon([X],[X]).                (une liste avec 1 élément n'a pas de doublon).

doublon([X:L1],L2) :-
        appart(X,L2),
        doublon(L1,L2).          (X est un doublon, continuer en coupant la tête).

doublon([X:L1],L2) :-
        doublon(L1,L3],
        L2=[X:L3].               (sinon X n'est pas un doublon, garder la tête).
```