Republique Du Niger

Ministère de L'enseignement Supérieur, de la Recherche et de L'Innovation Technologique

Département de Génie Informatique

Licence 3 Génie Logiciel

Introduction aux Systèmes Experts



Année Académique: 2025-2026

Alio Boubacar Goga, Researcher

Objectifs du cours

- Comprendre les bases des systèmes experts (SE)
- Comprendre la représentation des connaissances sous forme de règles
- Modéliser des connaissances sous forme de règles
- Implémenter un moteur d'inférence simple
- Appliquer les systèmes experts (SE) à des problèmes locaux du Niger
- Définir et situer les SE dans le domaine de l'Intelligence Artificielle (IA)
- Analyser un problème nécessitant une expertise humaine
- Mettre en œuvre des mécanismes de raisonnement (chaînage avant et arrière)
- Gérer l'incertitude dans un système expert
- Concevoir et implémenter un SE simple en Python ou Prolog ou Java.
- Évaluer les avantages et limites des SE

Plan du cours

- Introduction
- Systèmes à base de connaissance
- Principe de fonctionnement d'un SE
- Représentation des connaissances
- Raisonnement Incertain
- Méthodologie de Construction des SE
- Implémentation d'un SE
- Conclusion

Organisation du cours

- Cours Magistral (CM) : 12 H
- Travaux Dirigés (TD) : 09 H
- Travaux Pratiques (TP) : 09 H

Introduction

- Les premiers systèmes experts (SE) sont apparus dans les années 1970. MYCIN est l'un des plus célèbres systèmes experts médicaux.
- L'Intelligence Artificielle (IA) regroupe l'ensemble des méthodes ou algorithmes intelligents ou algorithmes d'IA visant à permettre à une machine de reproduire certaines capacités cognitives humaines telles que le raisonnement, la résolution de problèmes, la prise de décision et l'apprentissage. On distingue principalement deux grandes approches :
  - l'IA symbolique (basée sur la connaissance et le raisonnement logique),
  - l'IA connexionniste (basée sur l'apprentissage automatique ou machine learning et les réseaux de neurones).
- Les SE appartiennent à l'IA symbolique et constituent l'une de ses applications les plus structurées.

Introduction

- Un SE est un programme informatique capable de résoudre des problèmes complexes dans un domaine spécifique en utilisant des connaissances expertes formalisées et un mécanisme de raisonnement automatique.
- Il existe plusieurs définitions des systèmes experts :
- Un SE est un programme conçu pour simuler le comportement d'un humain qui est un spécialiste ou un expert dans un domaine très restreint.
- Pour Edward Feigenbaum (Standford), les SE sont des programmes conçus pour raisonner à propos des tâches dont on pense qu'elles requièrent une expertise humaine considérable. Exemple de la médecine d'urgence (l'expertise humaine dans ce cas n'est pas toujours accessible).

Introduction

- Les systèmes experts sont des programmes résolvant des problèmes qui sont habituellement résolus par des experts humains. Pour cela, ils requièrent un accès à une base de connaissances conséquente qui doit être construite de façon efficiente. Ils doivent être à même de fournir divers modes de raisonnement et de justifier les conclusions auxquelles ils aboutissent. Donc c'est un programme qui :
- incorpore à la fois des connaissances formelles et des jugements personnels de l'expert (sous formes d'heuristiques = une opération mentale rapide, science qui analyse la découverte des faits),
- explique à la fois le raisonnement conduisant aux réponses aux questions et le savoir qu'il contient,

Introduction

- est capable d'incorporer de nouveau savoir dans le savoir existant de manière incrémentale,
- sépare les connaissances et le contrôle (moyen d'utiliser les connaissances).
- Enfin, dialoguant (systèmes évolués) avec l'utilisation dans un langage proche du sien (langue naturelle « jargon » du domaine).

❑ Un système expert a pour vocation à faciliter le transfert d'expertise :

- de l'expert vers l'entreprise, dans le cas d'un départ
- de l'expert vers un utilisateur averti dans le cas d'un expert indisponible
- de l'expert vers d'autres experts, dans le cas d'une coopération.

Introduction

- Enfin un SE, est un logiciel, qui contient une base de connaissance sur un sujet particulier, et qu'il est capable de fournir sur ce sujet un conseil égal en qualité à celui que pourrait donner un expert humain reconnu.
- Un SE est un procédé qui relève de l'IA « faible », un logiciel capable de simuler le comportement expert humain dans un domaine précis.

Introduction

- Un SE est utile pour faire des tâches d‘analyse et de synthèse. Il a donc pour principe d’organiser et de diffuser une connaissance par classifications, diagnostics, interprétations, analyses d’objets, débogages, configurations, conceptions, planifications, commandes, contrôles, prédictions, réparations, dans le but d’une aide pour identifier des menaces, des risques, des pannes, etc.
- Les SE ont résolu certains types de problèmes comme en médecine, en droit, en chimie, etc. Parmi les problèmes abordés par les systèmes experts, nous citons :
  - Le diagnostic d’une défaillance à partir d’un ensemble d’observations ;
  - La conception d’une configuration de composants à partir d’un ensemble de contraintes ;

Introduction

- La planification d'une séquence d'actions pour l'accomplissement d'un ensemble de buts à partir de certaines conditions de départ et en présence de certaines contraintes ;
- La réparation d'un dysfonctionnement ;
- Le contrôle du comportement d'un environnement complexe.
- Edward Feigenbaum a défini les SE comme étant : « Un programme informatique intelligent utilisant des connaissances et des procédures d'inférences pour résoudre des problèmes assez difficiles ayant besoin d'une expertise humaine importante pour leur solution »
- Donc, un SE est un outil capable de mettre en œuvre des connaissances pour imiter le comportement et/ou le raisonnement des experts humains

Introduction

dans des domaines d'expertise qui sont souvent basés sur un gros volume de connaissances.

- Plus, c'est un logiciel capable de répondre à des questions en effectuant un raisonnement à partir de faits et règles connus. Il peut servir notamment comme outil d'aide à la décision.
- Les domaines d'application des SE : les SE ont résolu certains types de problèmes comme en médecine, en droit, en chimie, etc. Parmi les problèmes abordés par les systèmes experts, nous citons :
- Le diagnostic d'une défaillance à partir d'un ensemble d'observations ;
- La conception d'une configuration de composants à partir d'un ensemble de contraintes ;

Introduction

- La planification d'une séquence d'actions pour l'accomplissement d'un ensemble de buts à partir de certaines conditions de départ et en présence de certaines contraintes ;
- La réparation d'un dysfonctionnement ;
- Le contrôle du comportement d'un environnement complexe.

❖ Voici quelques domaines d'applicatin :

- Diagnostic médical,
- Maintenance industrielle,
- Aide à la décision,
- Finance et assurance,
- Agriculture et environnement,
- Éducation.

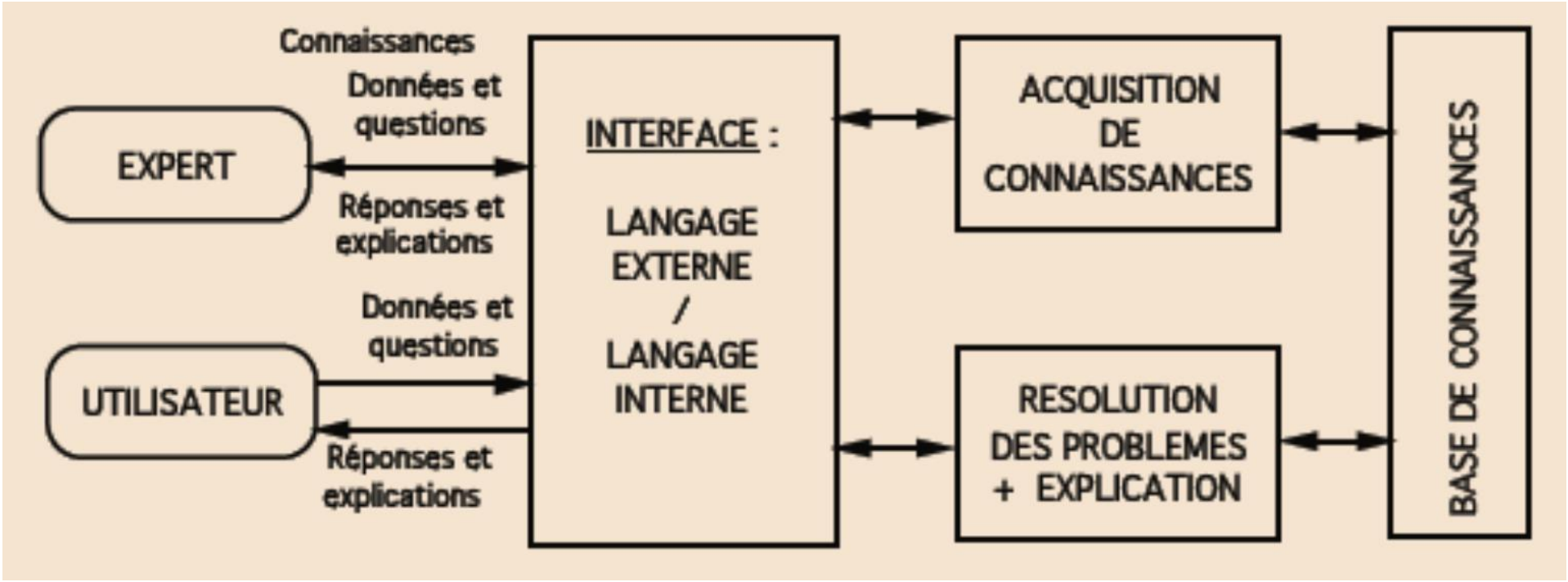
Introduction

- **Avantages** : explicabilité, cohérence, disponibilité permanente, capitalisation du savoir.
- **Limites** : difficulté d'acquisition des connaissances, rigidité, explosion combinatoire des règles.
- Le principal objectif des SE est de mettre en mémoire les connaissances théoriques de l'expert, de façon à ce qu'elles soient toujours disponibles et aussi de pouvoir retraduire les connaissances sous formes d'aide au diagnostic, c'est une sorte de: questions et réponses avec l'utilisateur.

Exemple : Un SE médical : ce système peut aider le médecin à rétablir son diagnostic au vu des observations que le médecin a observé.

Introduction

- Avec une base de données de plusieurs milliers de symptômes. Ainsi, le SE médical rendra un jugement extrêmement pointu contrairement au médecin qui lui pourrait omettre un ou deux détails.



Systèmes à base de connaissance

- L'IA est une branche de l'informatique qui permet la conception des Systèmes Intelligents (SI) capables de produire un raisonnement proche de celui de l'être humain. Ces SI sont en général à base de connaissances.
- **Une donnée** transporte l'information.
- **L'information** est une interprétation de la donnée.
- **La connaissance** utilise l'information dans le cadre d'actions, dans un but précis.
- **Les actions** peuvent être la prise de décisions, la création de nouvelles informations, etc.
- **La base de connaissances** : c'est un ensemble de connaissances dédié à un domaine particulier (c'est un ensemble de faits et de règles).

Systèmes à base de connaissance

- Un système à base de connaissances (**SBC**) est un programme construit pour modéliser les compétences de résolution de problèmes des humains.
- C'est à dire, un système informatique fonctionnant avec une base de connaissances explicite sur un sujet donné.
- Système Expert (SE) est un système informatique permettant de résoudre les problèmes dans un domaine d'application précis à l'aide d'une base de connaissances établie à partir de l'expertise humaine.
- C'est à dire un système expert classique est un cas particulier d'un système à base de connaissances (tout système informatique utilise de la connaissance, mais dans un système à base de connaissances, celle-ci est représentée de façon explicite).

Systèmes à base de connaissance

- Un expert doit :

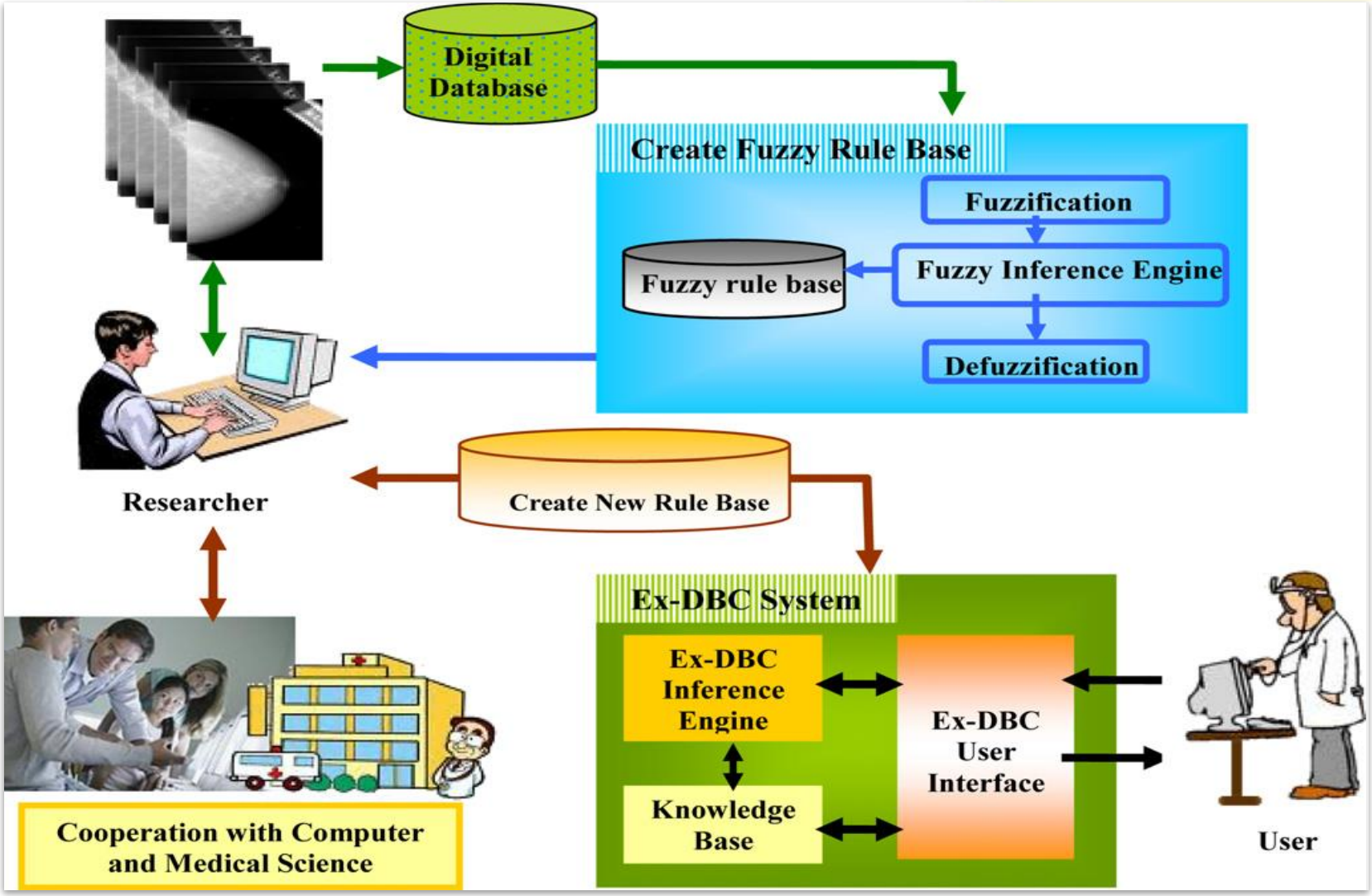
- Posséder un savoir spécialisé qui regroupe de vastes connaissances dans un domaine donné. Ce savoir ne se limite pas à des connaissances factuelles, mais il comprend un réseau de concepts, de règles, de méthodes qui forment l'expertise.
- Savoir utiliser les connaissances efficacement. Il ne suffit pas à l'expert de posséder de vastes connaissances, il doit pouvoir les utiliser rapidement et avec succès. Pour cela, il doit savoir poser les bonnes questions au client de façon à repérer les connaissances qui s' appliquent dans son cas.
- Connaître ses limites de façon à ne pas s' occuper de questions hors du cadre de sa compétence.

Systèmes à base de connaissance

- Fournir des explications appropriées sur les informations qu'il donne ou les solutions qu'il propose. Généralement, ce n'est pas l'expert qui décide, mais celui qui demande conseil. Il est donc un conseiller qui doit être capable de convaincre le client que sa solution est bonne.
- La consultation d'un expert est essentiellement un dialogue où celui-ci pose des questions de plus en plus précises pour identifier les connaissances dont il a besoin et où il explique les raisons de ses recommandations.
- Dans un tel dialogue, le client fournit des faits et pose des questions pour bien comprendre le sens de la solution proposée par l'expert. À la fin, il lui revient de prendre la décision finale

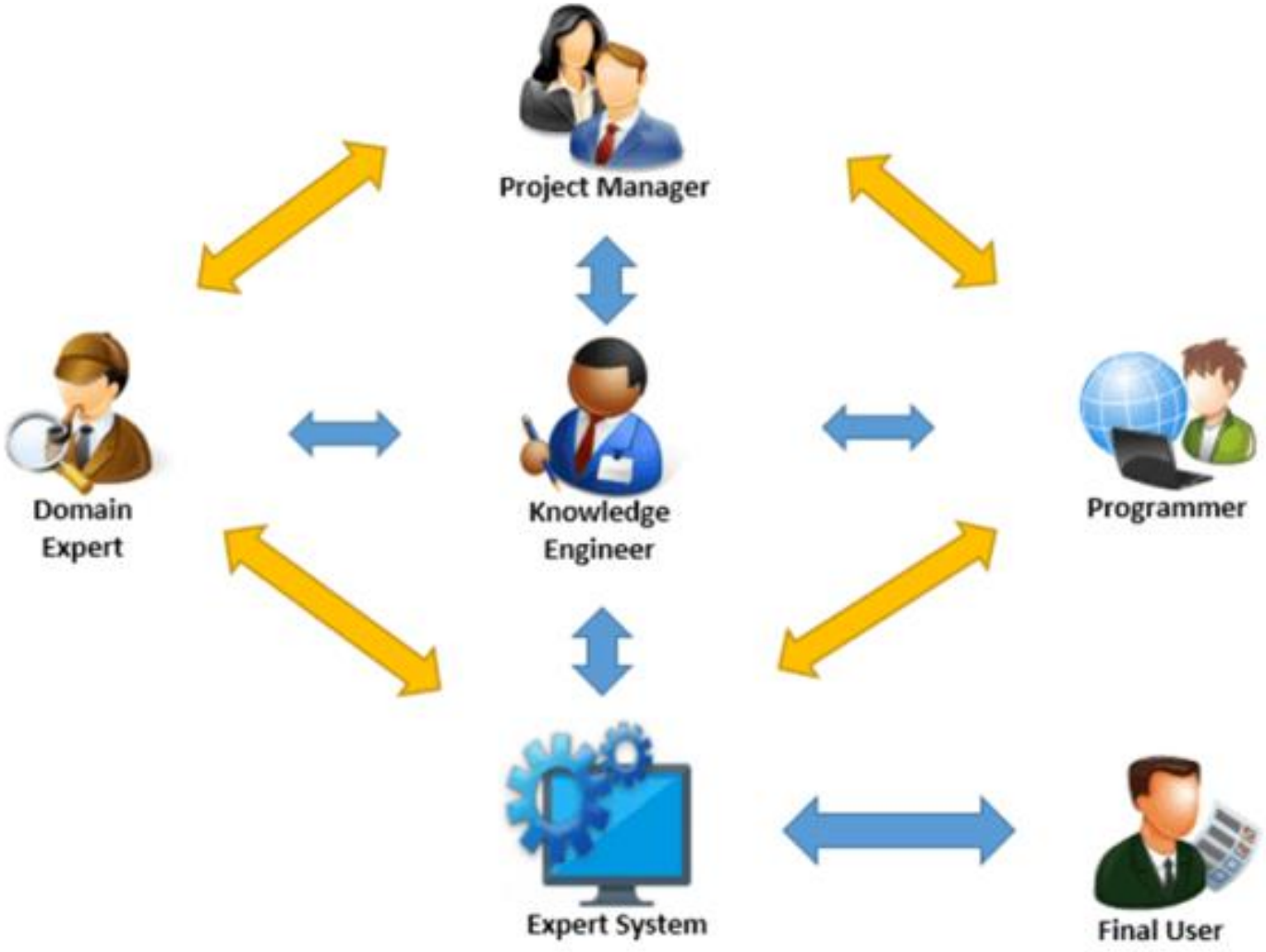
Remarque : La structure classique des systèmes experts utilisaient toujours un ensemble de règles de production.

Systèmes à base de connaissance



Système expert

Systèmes à base de connaissance



Système expert

Systèmes à base de connaissance

- Un système expert est un outil capable de reproduire les mécanismes cognitifs d'un expert, dans un domaine particulier.
- Plus précisément, un système expert est un logiciel capable de répondre à des questions, en effectuant un raisonnement à partir de faits et de règles connus.
- Il peut servir notamment comme outil d'aide à la décision.
- Dans tout système à base de connaissances ou système expert, on retrouvera à la base les composantes suivantes :
- Une base de connaissances composée d'une base de faits et une base de règles ;

Systèmes à base de connaissance

- Un moteur d'inférence : il est capable d'utiliser les faits et règles pour produire de nouveaux faits, jusqu'à parvenir à la réponse à la question posée.
- Une interface.
- L'ingénierie des connaissances est la gestion des connaissances au sein d'une organisation.
- Elle fait référence à l'ingénierie de systèmes complexes intelligents incorporant beaucoup de connaissances comme les systèmes à bases de connaissances et systèmes experts.
- L'identification des connaissances consiste en l'identification des connaissances critiques pour une organisation.

Systèmes à base de connaissance

- L'exploration de données (ou fouille de données ou encore datamining pour les anglophones) est la pratique (par des moyens automatiques ou semi-automatiques) de la recherche et de l'exploration de grands ensembles de données ayant pour résultat la découverte de motifs significatifs et de règles.
- Les résultats des analyses **Data Mining** ont pour but de connaître le comportement d'un usager, inférer puis prévoir son comportement.
- En entreprise, le **Data Mining** s'utilise principalement en :
  - **Marketing**: la connaissance du client, son comportement plus précisément est essentiel pour: mieux cibler les clients, les fidéliser, améliorer les forces de vente, améliorer la relation client.

Principe de fonctionnement d'un SE

- Un système Expert se propose de remplacer un expert humain afin d'aider l'utilisateur de prendre une décision (qui normalement est conforme aux exigences).
- Il est programmé pour raisonner sur des connaissances qui lui sont fournies par l'Expert Humain et qui sont appliquées dans le cas particulier de l'utilisateur. Il favorise la prise de décision des experts humains en se basant sur des axiomes.
- Dans son ensemble, il s'agira d'une évaluation par : Si prémisse alors conclusion. Avec comme prémisse une disjonction ou conjonction de faits connus pour valider la conclusion. Les inférences de choix et de preuves pourront partir des faits connus établis ou alors de conclusions connues pour déduire les uns ou les autres.

Principe de fonctionnement d'un SE

- Le système Expert est basé sur une approche déterministe. Il est donc utile d'avoir des faits connus pour les exploiter et d'avoir des règles pour valider ou invalider (par déduction) les faits.
- Les faits sont des expressions très variées (connaissances) utilisables pour conditionner puis réaliser l'exploitation de connaissances opératoires. Les faits constituent en général les conditions initiales de résolution à partir desquelles des connaissances pourront être utilisées.
- La valeur d'un fait est toujours vraie selon une propriété ou des critères donnés.
- Exemple

L'âge moyen des stocks de l'entreprise TechAmina est de 38 jours.

Abdoulayi habite Niamay.

Principe de fonctionnement d'un SE

- Pour un SE, le diagnostic est le but initial à valider ou invalider en fonction des liens avec des faits connus, déduits ou observés.
- Le diagnostic indique si le comportement d'un système est conforme aux demandes. Une séquence de diagnostic permettra de proposer différents comportements pour arriver à un résultat.
- Le diagnostic est à la fois une référence et un résultat qu'un SE doit prouver lors de son fonctionnement. Si la preuve n'est pas établie, le système passe au diagnostic suivant et si l'ensemble des diagnostics ne prouve rien, alors il y a échec de la recherche de solution. Il s'agit d'un fait référence à valider ou invalider. Il s'agit du point de validité d'un comportement dans le système.

Principe de fonctionnement d'un SE

- Une règle a pour construction une prémisse qui implique une conclusion. Les prémisses et les conclusions sont constituées de faits. Une conclusion peut être une prémisse d'une règle. Dans ce cas, pour valider une prémisse, il faudra alors valider la conclusion par la validé de sa prémisse.
- Ainsi, une règle est composée de faits liés avec des opérateurs logiques. Les règles représentent les connaissances opératoires qui permettent la déduction pour un système expert. Ce sont des règles déductives appelées règles de production.
- Les règles permettent de déduire d'autres faits. Les règles sont fournies par l'expert humain suite à son expérience dans le domaine.

Principe de fonctionnement d'un SE

- Une règle contient généralement deux parties :
  - une partie « déclencheur » de la règle : ce sont les conditions de déclenchement de la règle,
  - une partie effets de la règle.

Exemple de Prémisse et Conclusion

Si « fait connu » ALORS « fait déduit »

a) Cas d'une Prémisse unique

SI « condition » ALORS « conclusion »

SI « il pleut » ALORS « je porte un parapluie »

Nous pouvons remarquer que la règle peut aussi être exploitée en sens inverse. Sachant qu'il a porté un parapluie, nous déduisons qu'il a plu

Principe de fonctionnement d'un SE

b) Prémisses multiples (conjonction ou disjonction de conditions)

SI (condition1) ET (condition2) ALORS (conclusion)

SI (la pluie continue) ET (les égouts sont pleins) ALORS (la route est inondée)

- Enfin, la principale description est d'établir les liens entre les faits connus, les faits déduits pour proposer une règle.
- **Selon la description du domaine. « fait connu » : « fait déduit », (il pleut : je porte un parapluie)**

Exemple

SI « le malade présente de la fièvre » ET SI « le malade présente une augmentation de la vitesse de sédimentation dans le sang » Alors « il souffre d'une affection microbienne ».

Principe de fonctionnement d'un SE

De là, on va faire ressortir les conditions de déclenchement de la règle :

« Le malade présente de la fièvre », et « Le malade présente une augmentation de la vitesse de sédimentation dans le sang ».

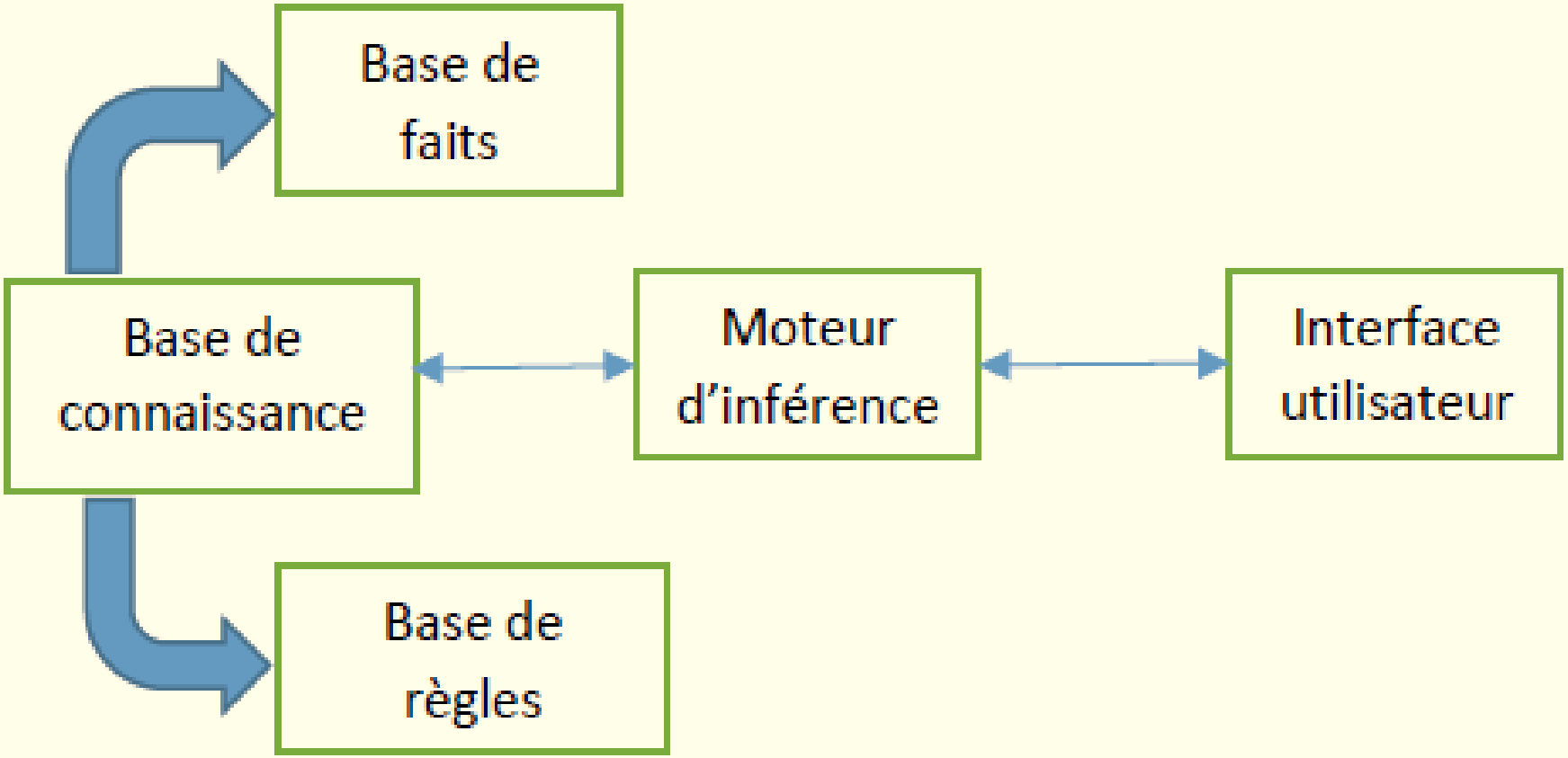
Alors l'effet de la règle est décrit par : « Il souffre d'une affection microbienne »

L'application de cette règle se traduira alors par la déduction d'un nouveau fait désormais établie : « Le malade souffre d'une affection microbienne ».

❖ **Principaux composants d'un SE :** Un SE est principalement composé de :

- ❑ une base de connaissances composée : base de faits et base de règles
- ❑ un moteur d'inférence.
- ❑ La figure suivante montre l'architecture d'un SE :

Principe de fonctionnement d'un SE



Architecture d'un système expert

Principe de fonctionnement d'un SE

- Pour toutes ces raisons, les SE sont organisés en trois niveaux distincts :

- **Interface Graphique :** Elle permet aux utilisateurs de consulter le système pour résoudre un problème donné du domaine d'expertise.
- **Base de connaissances** : Elle contient deux (2) bases notamment la base de faits et la base de règles.

- **La base de faits (BF)**, traduit les faits constatés, qui sont des assertions (déclarations, affirmations) indéniables (vraies) constatées dans le domaine considéré.

Il s'agit d'une base de données qui détermine l'ensemble de faits. Elle représente une partie de la connaissance d'un système expert sous formes déclaratives relatives à des faits connus.

Principe de fonctionnement d'un SE

- **Une Base de faits (l'expérience)** : elle contient les connaissances assertionnelles, c'est-à-dire les informations spécifiques et connues sur un problème (un cas) particulier traité. La valeur de vérité d'un fait est toujours vraie. La base de faits (**BF**) est la mémoire du travail d'un système expert, elle est modifiée au fur et à mesure de la progression du raisonnement.

Exemple de quelques faits :

Animal vole ;

Poids animal est inférieur à 10 gr ;

Animal pond des œufs.

- **La base de règles :** traduit les déductions qu'il est possible d'effectuer, chaque règle étant constituée de prémisses et de conclusions ;

Principe de fonctionnement d'un SE

- les prémisses sont des assertions à partir desquelles on peut affirmer les conclusions.

➢ **La base de règles :** Il s'agit de l'ensemble des règles de production donné sous forme d'une base de données.

- Alors, une base de règles contient les connaissances expertes, c'est à dire qu'elles représentent les raisonnements effectués par un expert. Ces connaissances sont appelées les unes à la suite des autres afin de créer des enchaînements de raisonnements et tous ces raisonnements peuvent être représentés sous forme de règles de production de type « **Si la condition est vraie alors exécuter action** ».

➢ **Une Base de règles (le savoir-faire) :** la base de règle (**BR**) modélise la

Principe de fonctionnement d'un SE

connaissance « générale » et le savoir de l'expert du domaine considéré et ce, sous forme de règles codées avec le langage utilisé par le système.

- **Les règles représentent** les connaissances opératoires qui permettent la déduction pour un système expert. Ce sont des règles déductives appelées **règles de production**.
- **Une règle se met sous la forme suivante :**

SI Condition_1 et Condition_2 et Condition_3 ... et Condition_n ALORS Action_1 et Action_2 et Action_3 ... et Action_p.

Exemple : Une règle de production :

SI l'animal pond des œufs et l'animal vole ALORS l'animal est un oiseau

Principe de fonctionnement d'un SE

❑ Le moteur d'inférence

- Inférer : c'est déduire une proposition à partir d'une autre proposition connue.
- Inférence ; il faut comprendre le raisonnement.
- Le moteur d'inférence : il s'agit d'un programme qui parcourt la base de connaissance en appliquant les règles aux faits connus donnés.

Le moteur d'inférence est l'équivalent de l'esprit logique de l'expert humain qui raisonne sur des faits connus pour en sortir de nouvelles vérités. Il n'est pas lié à l'expertise et peut et doit être un programme qui raisonne sur diverses et plusieurs bases de connaissances.

Principe de fonctionnement d'un SE

- Stratégie et raisonnement du moteur d'inférence : Comme le moteur d'inférence est un programme indépendant chargé d'exploiter les connaissances et les faits pour mener un raisonnement. Il s'arrêtera lorsqu'il aura acquis les faits nécessaires pour aboutir à une conclusion.

Stratégie : Autrement, le moteur d'inférence est le cœur de tout système expert. Il peut être décrit par :

- ✓ une stratégie de recherche, selon différentes stratégies, le moteur d'inférence utilise des règles, les interprète, les enchaîne jusqu'à arriver à un état représentant une condition d'arrêt,
- ✓ une méthode de chainage,

Principe de fonctionnement d'un SE

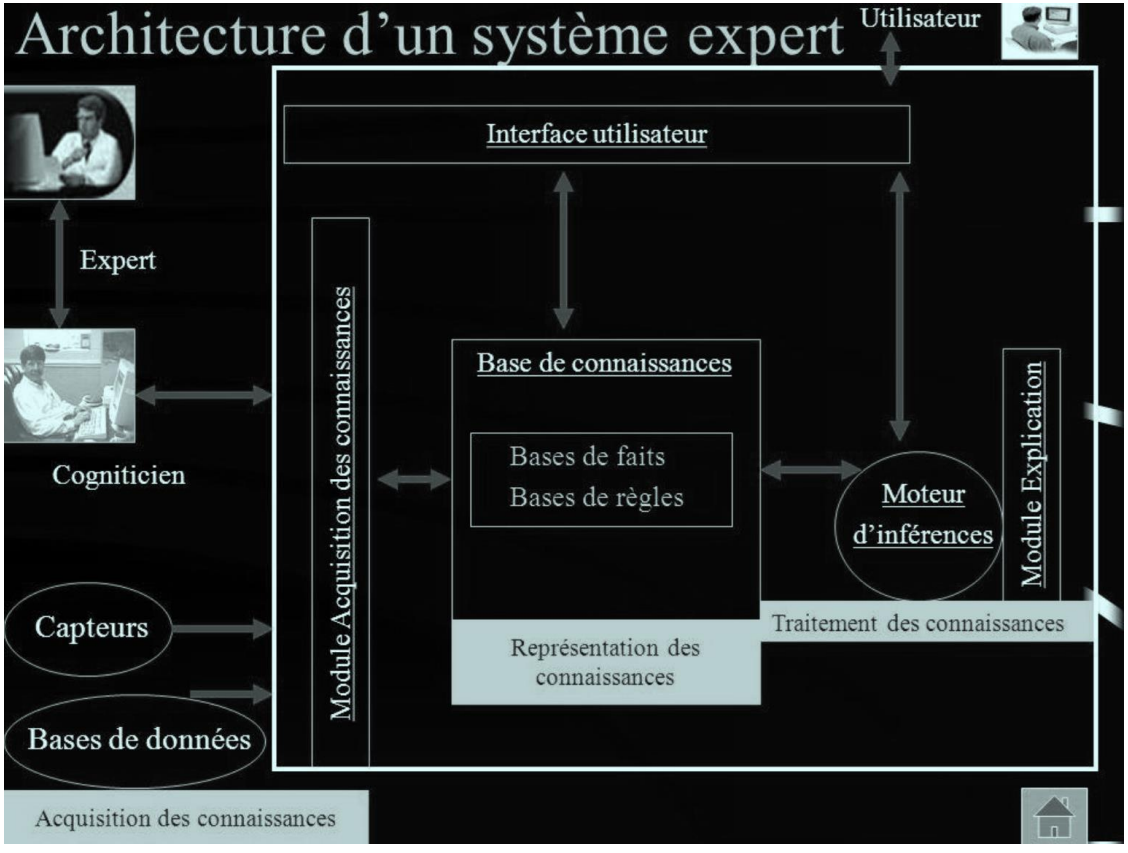
- ✓ une tentative et des méthodes de résolutions des conflits (par exemple favoriser les règles dont les prémisses sont les plus courtes. favoriser les règles dont les résultats antérieurs sont les plus fructueux).

Raisonnement : Appelé également démonstrateur de théorème, le moteur d'inférence est chargé d'appeler et d'utiliser les informations contenues dans la base de connaissances, correctement, pour répondre à une question ou résoudre un problème. Il effectue des déductions grâce à deux principales stratégies de raisonnement qui sont :

- ✓ Stratégie relative au chaînage : chaînage avant, chaînage arrière et chaînage mixte.
- ✓ Stratégie relative au parcours : parcours en largeur d'abord et parcours en profondeur d'abord.

Principe de fonctionnement d'un SE

Pour que la prémisse déclenche la règle, il faut qu'elle s'apparente à l'un des faits connus. Nous disons que la recherche de la conclusion est guidée par les faits. Pour que la conclusion déclenche la règle il faut qu'elle s'apparente au but recherché. Nous disons que la recherche est guidée par le but.



Principe de fonctionnement d'un SE

En resumé : la base de règles est composé des algorithmes permettant de faire la déduction :

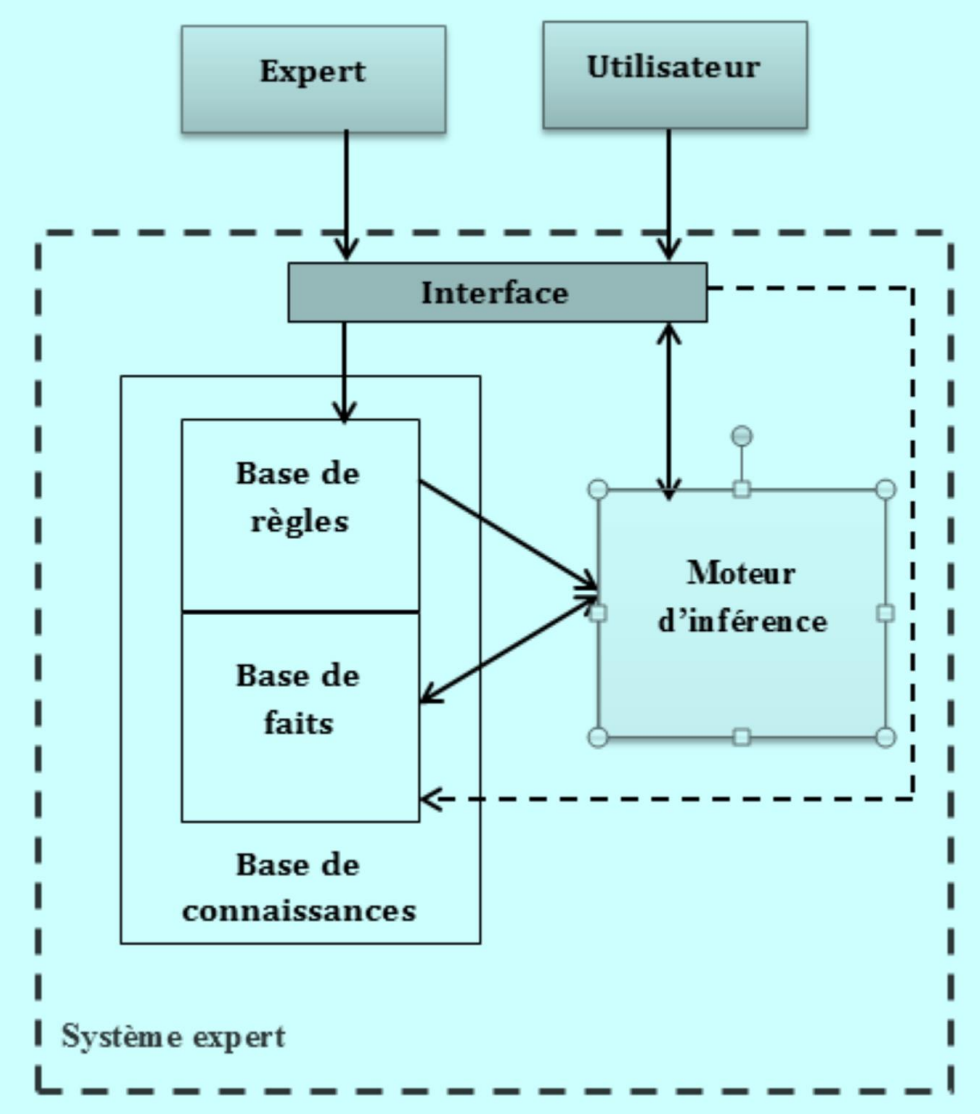
- **Chaînage avant**
- **Chaînage arrière**
- **Chaînage mixte.**

❖ Selon la représentation de connaissances, il y a deux générations principales de SE :

- Les systèmes experts de première génération : utilisent des règles **Si-Alors** pour représenter les connaissances ;
- Les systèmes experts de deuxième génération : sont plus flexibles et utilisent différentes formalismes pour représenter les connaissances.

Principe de fonctionnement d'un SE

- La figure suivante, représente les composants de base d'un système expert.



Principe de fonctionnement d'un SE

- **Quelques SE :** Les SE ont fait leur apparition dans certains domaines, particulièrement en médecine et ce dans plusieurs spécialités. Voici, quelques exemples des SE existants dans le domaine médical :
- MYCIN : identification des microorganismes responsables des infections, conseil sur le choix d'un antibiotique.
- PROTIS : Diabétologie aide les médecins généralistes dans le traitement du diabète.
- SPHINX : aide au traitement du diabète NID, aide au diagnostique des ictères, proposition d'un modèle de simulation d'une consultation médicale.
- SETH : diagnostic et traitement des intoxications médicamenteuses.
- AES: proposition d'un traitement antibiotique.

Principe de fonctionnement d'un SE

- **Le fonctionnement général d'un Système Expert se résume en ces points :**

1. **chercher à prouver le premier diagnostic de la liste.**
2. **chercher la ou les règles qui ont ce diagnostic en conclusion (chaînage arrière).**
3. **chercher à prouver les prémisses :**

a. **par des faits initiaux (s'ils existent),**

b. **par des déductions (enchaînées),**

c. **par des questions.**

4. **si le 1er diagnostic échoue, nous passons au deuxième et puis aux suivants**
5. **dès qu'un diagnostic est prouvé, nous affichons : « SUCCES et proposer la conclusion »**
6. **si aucun diagnostic ne peut être prouvé, nous affichons : « ECHEC ».**

Représentation des connaissances

- La représentation des connaissances est un domaine de recherche de l'IA qui traite des modèles de représentation de l'information ou des connaissances dans le but de former des hypothèses et de produire des inférences.
- Comme vu précédemment, l'IA cherche à reproduire l'intelligence pour résoudre des problèmes complexes. Pour simuler sur un ordinateur un processus de résolution de problème ou prise de décision, il faut disposer d'une représentation de la connaissance à exploiter.
- Une mise en œuvre de raisonnement sur les connaissances représentées est déclenchée pour trouver des solutions aux problèmes posés.

Représentation des connaissances

- On définit la connaissance ou les connaissances comme ce qu'on a appris par l'étude ou par la pratique. La représentation de la connaissance consiste en la reformuler en une forme symbolique compréhensible et interprétable par un ordinateur.
- Les connaissances concernent des faits, considérés vrais dans un certain monde. Pour représenter ces faits on a recours à un formalisme ou mode de représentation. Le langage naturel est un outil informel pour représenter les connaissances. L'arithmétique et la logique, plus formels, sont aussi des outils de représentation.
- De même qu'il n'y a pas de langage universel de programmation, il n'existe pas de formalisme « idéal » pour représenter les connaissances.

Représentation des connaissances

- La représentation des connaissances est le support préalable aux traitements ultérieurs que l'on souhaite effectuer sur ces connaissances. Le choix du formalisme à utiliser dépend souvent du domaine d'application.
- Dans ce qui suit, quelques formalismes de représentation des connaissances largement utilisés en intelligence artificielle sont présentés.
- Les formalismes logiques et surtout la logique des prédicats jouent un rôle important dans tout ce qui relève de la représentation des connaissances. Ils bénéficient d'une base mathématique solide en termes de mécanismes de raisonnement qui procèdent uniquement par manipulation symbolique.
- La logique est une approche déclarative pour représenter les connaissances. Deux principaux outils mathématiques sont utilisés :

Représentation des connaissances

- Logique propositionnelle **:** Méthode de preuve efficace. Cependant, trop restreinte car il n'y a pas de quantificateurs ;
- Logique des prédicats **:** Méthodes qui s'arrêteront si c'est un théorème mais risquent de ne pas s'arrêter si on l'applique à une formule non valide (semi-décidable).

❑ La logique est basée sur l'utilisation des méthodes d'inférence bien connues pour déduire de nouvelles connaissances.

❖ Une proposition est un énoncé qui peut être vrai ou faux (**les constantes**)**.** La proposition constitue l'élément essentiel de la logique propositionnelle. Par exemple : Tous les nombres impairs sont des nombres premiers.

Représentation des connaissances

- Règles de production (Logique des propositions)

SI...ALORS...

Exemple :Si Ali est un homme alors Ali est mortel

- Logique du premier ordre (Calcul des prédicats)

Exemple : Homme(x) alors mortel(x)

- Voir le cours de Programmation Logique pour plus de détails.

Représentation des connaissances

❖ **Modélisation d'expression**

Tous les étudiants sont nigériens : $\forall x\ Etud(x) \rightarrow Nig(x)$.

Quelques étudiants ne sont pas nigériens : $\exists x\ Etud(x) \cap \neg Nig(x)$.

Aucun étudiant n'est un nigérien : $\forall x\ Etud(x) \rightarrow \neg Nig(x)$.

« Tous les A sont B » : $\forall x\ (A(x) \rightarrow B(x))$;

« Seuls les A sont B. » : $\forall x\ (A(x) \rightarrow B(x))$;

« Aucun A n'est B » : $\forall x\ (A(x) \rightarrow \neg B(x))$;

« Quelques A sont B» : $\exists x\ (A(x) \wedge B(x))$.

Représentation des connaissances

Représenter les propositions suivantes dans la logique des prédicats

1. Jean est plus grand que Marie
2. Si Jean est un homme, alors il est mortel
3. Un chat est entré
4. Tous les éléphants ont une trompe
5. Tout le monde est loyal à quelqu'un
6. Tout le monde aime une chanson de Johnny
7. Pour tout crime il y a quelqu'un qui l'a commis
8. Seuls les gens malhonnêtes commettent des crimes
9. Les gens malhonnêtes arrêtés ne commettent pas de crimes
10. Chaque étudiant fait quelques déductions, mais aucun ne les fait tous
11. Chaque personne aime quelqu'un et personne n'aime tout le monde, ou bien quelqu'un aime tout le monde et quelqu'un n'aime personne.

Raisonnement Incertain

- La modélisation du raisonnement incertain est une nécessité souvent
- rencontrée dans les systèmes experts. Dans la logique classique, un fait
- peut être vrai ou faux, mais les connaissances humaines ne sont souvent
- pas aussi précises. Dans la plupart des cas, les réponses des experts aux
- problèmes peuvent être incertaines et/ou inexactes.
- Une connaissance (faits ou règles) est incertaine si elle n'est ni vraie, ni fausse, mais seulement probable. De même, une connaissance est imprécise si elle est mal définie.
- Dans le domaine de la santé, par exemple, un diagnostic peut être fait sur un patient à partir de différentes observations. Plus, qu'il y a des éléments qui dirigent vers la même conclusion, plus on a confiance à ce diagnostic.

Raisonnement Incertain

- Par contre, il est possible d'être dans l'erreur et/ou que d'autres observations contredisent les résultats. Donc, il peut arriver que nous soyons incertains de nos hypothèses et conclusions.
- Il existe différentes sources de l'incertitude :
- La probabilité qu'un évènement se produise ou non ;
- La confiance d'un expert envers un fait et la difficulté à justifier cette confiance. De plus, la difficulté à combiner différents vues d'experts peut mener à des règles conflictuelles, d'où la nécessité de pondérer les règles de chaque expert ;
- Langage imprécis : langage naturel ambigu et présence de termes comme souvent, fréquemment, dès fois…etc ;

Raisonnement Incertain

- Les exceptions aux règles qui peuvent être des sources d'incertitude ;
- La quantification de valeurs : par exemple, on peut quantifier la fièvre du corps humain par : « fièvre normale », « fièvre normale », « fièvre sévère » ;
- Données inconnues : cela mène à un raisonnement approximatif, tolérant la présence de valeurs inconnues ;
- Implications faibles : souvent difficile de corréler «fortement» les parties conditions et conclusions d'une règle.

❖ Deux grandes approches de traitement de l'incertitude sont utilisées dans les systèmes experts.

- La première catégorie concerne les approches statistiques comme la théorie de bayes, les facteurs de certitude et la théorie de Dempster-Shafer.
- La deuxième comprend les approches liées aux ensembles floues.

Raisonnement Incertain

- **Approche probabiliste et réseaux bayésiens :** cette approche est basée sur les probabilités mathématiques. Les réseaux bayésiens permettent de gérer l'incertitude dans les systèmes intelligents. Les réseaux bayésiens sont basés sur le théorème de bayes. Pour comprendre ces notions, il faut d'abord examiner de près la notion de probabilité conditionnelle.

- La théorie de Bayes : la théorie probabiliste permet de déterminer la probabilité a posteriori qu'un évènement H se produise sachant que l'évènement E est réalisé, en fonction de sa probabilité a priori. La règle de Bayes permet la révision probabiliste, et est utilisée dans le cadre de probabilités conditionnelles binaires (malade / non malade sachant que je présente les symptômes). Elle nous permet de réviser nos jugements dès lors que nous obtenons une nouvelle information.

Raisonnement Incertain

Ceci équivaut à passer d'une probabilité *a priori* -précédent la prise en compte du nouvel élément- à une probabilité *a posteriori* -faisant suite à la prise de connaissance de la nouvelle information

Par exemple, si nous avons :

$P(E)$ = Probabilité à priori de E

$P(H)$ = Probabilité à priori de H

$P(H|E)$ = Probabilité à postériori de H sachant E

$P(E|H)$ = Probabilité à postériori de E sachant H

$P(E|H)P(H) = P(H \cap E) = P(H|E)P(E)$, d'où il est possible d'obtenir :

$$\frac{P(H|E)P(E)}{P(E)} = \frac{P(E|H)P(H)}{P(E)}$$

Raisonnement Incertain

Ce qui en résulte la théorie de bayes : $P(H|E) = \frac{P(E|H)P(H)}{P(E)}$

- Utilisons cet exemple trouvé dans une étude :

- Supposons que :

H : est l'évènement qu'un patient a un cancer du poumon ;

E : est l'évènement qu'un patient fume ;

Nous voulons calculer P(H|E) c'est-à-dire la probabilité qu'un patient a un cancer du poumon sachant qu'il fume, sachant que :

P(H) = 5% est la probabilité d'avoir un cancer du poumon dans la population en général ;

P(E) = 10% est la probabilité qu'une personne fume ;

Nous pouvons aussi avoir l'équation :

Raisonnement Incertain

P(patient est un fumeur| patient a un cancer du poumon), la probabilité dans cette équation peut être obtenue à partir de l'expérience. Par exemple, nous pouvons avoir le pourcentage des personnes atteintes d'un cancer du poumon qui sont fumeur. Supposons que P(E|H)= 75%.

- Donc, dans le cas où on a l'observation que le patient est un fumeur, nous pouvons calculer la probabilité d'avoir un cancer du poumon sachant qu'il est fumeur avec le théorème de Bayes comme suit :

$$P(H|E) = \frac{P(E|H)P(H)}{P(H)} = \frac{75\% * 5\%}{10\%}$$

$$P(H|E) = 37{,}5\%$$

Donc, nous pouvons conclure que :

P(H|E)=P(patient a un cancer du poumon| patient fume)= 37,5%.

Raisonnement Incertain

- Le raisonnement incertain est l'un des caractéristiques du raisonnement humain. De ce fait, le raisonnement incertain est l'un des problèmes les plus rencontrés dans les systèmes experts.
- Dans cette partie, nous avons introduit la notion de l'incertitude dans les systèmes experts.

Méthodologie de Construction des SE

- Pour résoudre un problème, l'être humain fait appel à ses connaissances
- pour faire des raisonnements. L'expert humains acquiert et développe sa
- connaissance au cours de son travail en percevant de l'information. Au fur et
- à mesure, ces informations se structurent et s'organisent en connaissances sans effort de la part de l'expert.
- Faire reproduire le comportement de raisonnement humain par un programme est une tâche lente et délicate qui nécessite de passer par des phases d'extraction, de modélisation et de formalisation de la connaissance.
- Chacune de ses phases devra faire appel à des méthodes et outils adéquats. L'acquisition de la connaissance est certainement la tâche la plus complexe et la moins formelle.

Méthodologie de Construction des SE

- **Les problèmes adaptés aux systèmes experts :** les chercheurs ont défini un ensemble informel de critères pour déterminer si un problème est adapté ou non à un système expert :
  - Le champ d'application des systèmes experts est vaste : ils permettent par exemple d'aborder des problèmes pour lesquels les données sont imprécises, voire incomplètes ;
  - Le problème est de nature symbolique, faisant intervenir des heuristiques et ne nécessitant pas des méthodes numériques classiques ;
  - Les connaissances mises en œuvre sont de nature qualitative que quantitative ;
  - Une solution algorithmique connue possible n'existe pas ;

Méthodologie de Construction des SE

- L'utilisation du système expert doit être justifiée :
  - L'évolution rapide des connaissances qui nécessite des mises à jour fréquentes ;
  - La mémorisation du savoir-faire accumulé par des personnes travaillant sur un problème donné ;
  - La grande taille et la complexité de l'information à manipulé.
- **Historique** : Dans cette section nous présentons une liste non exhaustive de quelques systèmes experts bien connus dans différents domaines.
- **DENDRAL (1965, chimie) :** est le premier système expert permettant d'avoir un raisonnement dans le domaine de la chimie.

Méthodologie de Construction des SE

- **MYCIN (1972-1974, Medecine)** : est dédié au diagnostic des maladies infectieuses du sang (et des méningites dans une version ultérieure) et à la prescription médicale. C'est le premier à bien séparer le moteur d'inférence de la base de connaissances et à pouvoir expliquer ses raisonnements.
- **PROSPECTOR (1976, Géologie)** : utilise la logique floue ou probabilité avec un raisonnement bayésien pour l'évaluation de la richesse en minerais d'un site géologique.
- **XCON (1978, Informatique)** : est développé par Digital Equipment Corporation (DEC) pour la configuration d'ordinateurs VAX-11 à partir de spécifications client.

Méthodologie de Construction des SE

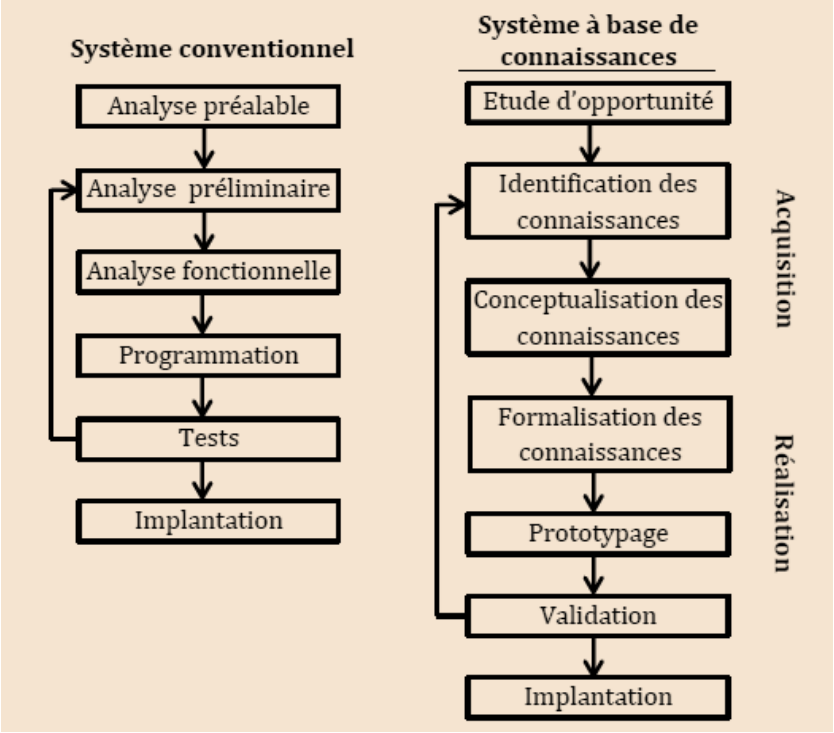
- **TAXMAN (1977, industrie)** : développé par l'équipe de MacCarthy. TAXMAN est un système expert capable de conseiller une entreprise sur la meilleure façon de payer le moins de taxes possible. Depuis, le système a été repris et étendu par diverses entreprises.
- **LPS (1979, Mathématique)** : système expert de résolution des problèmes de géométrie.
- **DELTA (1980, industrie):** développé pour le diagnostic des pannes de locomotives.
- **DART (1981, Informatique) :** développé pour le diagnostic des pannes d'ordinateurs et de systèmes

Méthodologie de Construction des SE

- Le développement des systèmes informatiques suit une démarche planifiée et fait appel à des méthodes et des outils de travail appropriés. De même, le
- développement des systèmes experts fait recours à des méthodes déjà éprouvées dans d'autres domaines d'informatique. Toutefois, la particularité
- inhérente aux systèmes experts et aux systèmes à base de connaissances d'une manière générale nous obligent à employer des méthodes spécifiques de l'ingénierie de connaissance.
- La figure suivante montre les principales tâches prises en charge par l'ingénierie des connaissances à celles d'un système conventionnel. Cette démarche fait place à l'analyse, à la conception, à la programmation, aux tests et à l'implantation.

Méthodologie de Construction des SE

- Ces tâches: Ce sont des tâches couramment exécutées lors du développement de n'importe quel système informatique. La principale différence dans le processus de développement des systèmes à base de connaissance réside dans l'importance accordée aux connaissances. Elles font l'objet de trois étapes : l'identification, l'acquisition et la représentation.



Méthodologie de Construction des SE

- **Etude de l'opportunité** : étudie le domaine de connaissance à modéliser, les tâches effectuées par les experts pour évaluer la pertinence et le rapport coûts-bénéfices d'envisager une solution informatique ;
- **Identification des connaissances** : définit le type de données et solutions produites par l'expert. Ensuite, identifié les tâches que devrait effectuer le système expert pour imiter le comportement d'un expert ;
- **Acquisition des connaissances** : recueille les connaissances nécessaires à la réalisation du système expert auprès des experts ;
- **Représentation des connaissances** : c'est l'étape de la formalisation des connaissances pour les traduire en règles de production ou autre formalisme choisie par le système expert ;

Méthodologie de Construction des SE

- **Prototypage** : c'est l'implémentation progressive du système expert et la conception de l'interface utilisateur ;
- **Validation** : vérifie les résultats fournis par le système auprès des experts, des utilisateurs et du responsable du projet ;
- **Implantation :** c'est la mise en marche du système dans son contexte et l'initiation des utilisateurs à son exploitation.

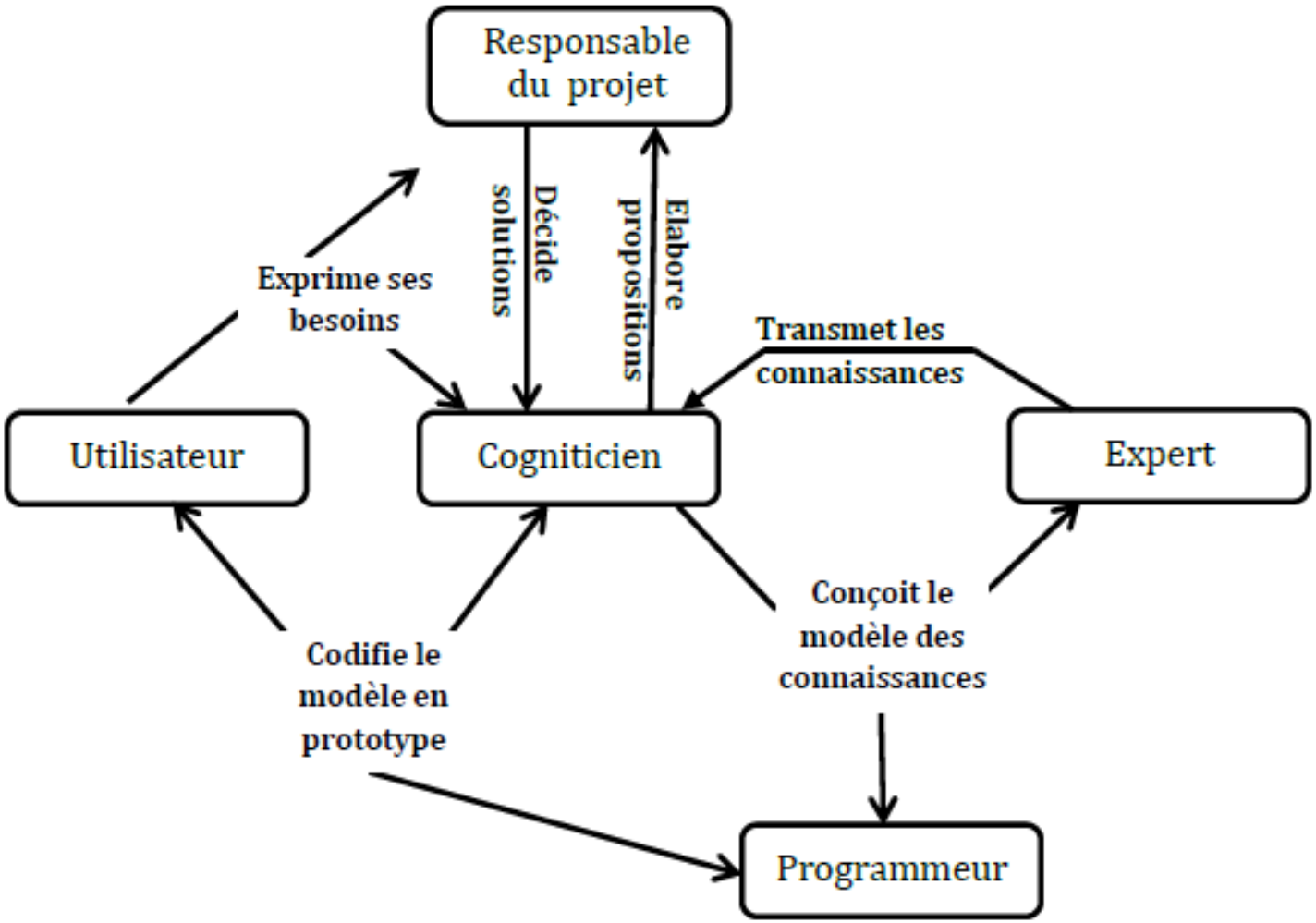
❖ **Les intervenants et leurs rôles :** Intervenants est un terme générique désigne les personnes impliquées dans le développement d'un système informatique. La réalisation d'un système expert repose essentiellement sur trois acteurs : **l'expert, le cogniticien et l'informaticien**.

Méthodologie de Construction des SE

- L'expert du domaine : c'est la personne qui a la plus grande expérience ou connaissance dans un domaine particulier et qui est capable et habile dans la résolution des problèmes relatifs à son domaine d'expertise, ainsi l'expérience et les connaissances qu'il possède constitueront la base sur laquelle le système sera développé ;
- Le cogniticien : ou l'ingénieur de la connaissance. Le cogniticien recueille et analyse la connaissance fournie par l'expert ;
- L'informaticien : ou le programmeur choisit l'outil de développement et structure les données pour les entrer en machine.

❖ En plus de ces trois acteurs, on trouve le responsable de projet et les utilisateurs. La figure suivante illustre les échanges entre les intervenants lors du développement d'un système expert :

Méthodologie de Construction des SE



Méthodologie de Construction des SE

- Un SE peut être réalisé en se basant sur un langage tel que Pascal ou C, mais on choisira plus facilement Lisp, Prolog, ou un lange orienté objet (C++, Smaltalk, Python, Java, …). En effet, ces langages sont mieux adaptés au raisonnement des systèmes experts que les langages classiques qui sont plus appropriés à une programmation procédurale et séquentielle.
- Un système expert général est obtenu par l'union d'un moteur d'inférence et d'une interface. On l'appelle aussi coquille, shell ou encore un système expert vide. C'est un système expert dont la base de connaissance est à remplir. Ces systèmes sont appelés aussi : les générateurs de systèmes experts.

Méthodologie de Construction des SE

- Ce sont des environnements complets et généraux qui intègrent un moteur d'inférence (indépendant de la base de connaissance) ainsi que divers modules d'aide au développement tels qu'un éditeur de connaissances pour le remplissage de la base, un tableur, un gestionnaire de base de données…etc.
- La convivialité et l'efficacité d'un système expert dépend fortement des modules, des fonctions, interfaces, logiciels qui tournent autour du système. La principale difficulté rencontrée lors du développement d'un système expert se trouve au niveau de l'acquisition des connaissances qui est toujours une tâche longue et fastidieuse. Cette tâche met en collaboration deux personnes l'expert et le cogniticien.

Méthodologie de Construction des SE

- Au début, les SE n'avaient pour objet que la résolution automatique des problèmes. Les systèmes à base de connaissances qui leur ont succédé avaient comme objectif de créer une coopération entre le système et l'utilisateur à travers le dialogue, au lieu de restituer une solution au problème par manipulation aveugle da la connaissance.
- Dans ce cas, le système doit avoir accès non seulement aux termes utilisés par l'être humain, mais également à la sémantique que ce dernier associe aux différents termes pour une meilleure communication.
- Pour modéliser la richesse sémantique des connaissances, l'emploie des règles de production par les systèmes experts, ne suffit plus. De nouveaux formalismes ont été introduits.

Méthodologie de Construction des SE

Ces formalismes sont basés sur l'utilisation des ontologies. Les langages à base de frame, les logiques de descriptions, les graphes conceptuels sont des exemples de tels formalismes.

- Les SE sont moins à la mode en 2026 qu'en 1974. L'idée de ces systèmes est apparue au début des années 6O avec les premiers pas de l'IA et le premier SE (DENDRAL).
- Depuis les années 1990, nous parlons beaucoup plus de « Systèmes Interactifs d'Aide à la Décision », une façon de réintégrer l'être humain dans le processus de prise de décision de l'ordinateur.
- Enfin, nous pouvons dire que les SE peuvent apporter un plus dans tous les domaines où la prise de décision nécessite des connaissances volumineuses.

Implémentation d'un SE

❖ Système expert médical : Détection du risque de cancer du sein

❑ **Objectif du SE :** Déterminer le niveau de risque de cancer du sein chez une patiente à partir de symptômes cliniques simples.

Sorties possibles du SE :

- Risque faible
- Risque modéré
- Risque élevé

❑ **Base de connaissances (expert médical) : Symptômes pris en compte** :

- masse palpable dans le sein
- douleur mammaire
- écoulement anormal
- modification de la forme du sein

Chaque symptôme est oui / non.

Implémentation d'un SE

- **Règles expertes (raisonnement déterministe) :**

Règle	Conclusion
Masse + modification forme	Risque élevé
Masse + écoulement	Risque élevé
Masse seule	Risque modéré
Douleur seule	Risque faible
Aucun symptôme	Risque faible

Implémentation d'un SE

- **Implémentation complète en Python :**
  - Base de règles:

```
def regles_cancer_sein(masse, douleur, ecoulement, modification):
    """
    Base de règles expertes pour le cancer du sein
    """
    if masse and modification:
        return "RISQUE ÉLEVÉ"
    elif masse and ecoulement:
        return "RISQUE ÉLEVÉ"
    elif masse:
        return "RISQUE MODÉRÉ"
    elif douleur:
        return "RISQUE FAIBLE"
    else:
        return "RISQUE FAIBLE"
```

Implémentation d'un SE

- **Implémentation complète en Python :**
  - Moteur d'inférence (chaînage avant) :

```
def moteur_inference(masse, douleur, ecoulement, modification):
    """
    Moteur d'inférence du système expert médical
    """
    decision = regles_cancer_sein(masse, douleur, ecoulement, modification)
    return decision
```

  - Le chaînage avant est une technique de raisonnement (ou de déduction) utilisée dans les SE qui consiste à partir des faits connus (données de départ) pour appliquer des règles logiques dans l'objectif de découvrir de nouvelles conclusions progressant ainsi de manière déductive et chronologique (du début à la fin) .

Implémentation d'un SE

- Voici le principe et le mode de fonctionnement des SE :

Principe : Utilisation des règles de la forme « **Si (prémisses) ALORS (conclusion)** » pour déduire de nouveaux faits à partir des faits initiaux.

Fonctionnement : nous avons une BF et BR.

✔ Le moteur d'inférence identifie les règles dont les conditions sont remplies par les faits existants.

✔ Les conclusions de ces règles sont ajoutées à la base de faits.

✔ Le processus se répète jusqu'à ce qu'aucune nouvelle règle ne puisse être déclenchée.

- **Explication claire du chaînage avant dans ce SE médical :** dans ce SE médical pour le diagnostic du cancer du sein, le chaînage avant fonctionne selon les étapes suivantes :

Implémentation d'un SE

◈ **Initialisation de BF** : Le SE commence par collecter les faits initiaux, issus de l'observation ou des réponses de la patiente. Exemple de faits :

- ✔ masse = vrai
- ✔ douleur = faux
- ✔ écoulement = vrai
- ✔ modification forme = faux

Ces informations constituent la base de faits.

◈ **Parcours de la BR :**le moteur d'inférence parcourt toutes les règles de la base de connaissances et cherche celles dont les conditions sont satisfaites par les faits actuels. Exemple de règle :

SI masse = vrai ET écoulement = vrai ALORS risque = élevé

Implémentation d'un SE

◈ **Activation des règles (déclenchement) :** lorsque les conditions d'une règle sont vraies :

✔ la règle est activée

✔ sa conclusion est déduite

Dans notre exemple d'étude de cas :

masse = vrai ✔

écoulement = vrai ✔

→ Alors la règle est déclenchée

◈ **Mise à jour de la base de faits : l**a conclusion obtenue est ajoutée à la BF.

Donc, le Nouvel fait ajouté est :**risque = élevé**

Implémentation d'un SE

- **Arrêt du raisonnement** : le processus s'arrête lorsqu'une conclusion finale est atteinte (dans notre cas, c'est le niveau de risque), ou aucune nouvelle règle ne peut être déclenchée. Par conséquent, dans cette situation, le système conclut : RISQUE ÉLEVÉ
- Voici, un schéma logique du chaînage avant :



Implémentation d'un SE

◈ Pourquoi le chaînage avant est adapté aux systèmes médicaux ?

Réponses :

✔ Le médecin observe d'abord les symptômes ;

✔ Les données sont connues avant la décision ;

✔ Le raisonnement progresse naturellement vers un diagnostic ;

✔ Facile à expliquer et à justifier ;

◈ Le chaînage avant est une stratégie de raisonnement fondamentale dans les SE médicaux, car elle permet de déduire des conclusions fiables à partir d'observations cliniques initiales, de manière progressive et explicable

Implémentation d'un SE

- **Implémentation complète en Python :**
  - Interface utilisateur (consultation médicale) :

```
def interface_medicale():
    print("===== SYSTÈME EXPERT : CANCER DU SEIN =====")
    print("Répondez par oui ou non\n")

    masse = input("Présence d'une masse palpable ? ").lower() == "oui"
    douleur = input("Douleur mammaire ? ").lower() == "oui"
    ecoulement = input("Écoulement anormal ? ").lower() == "oui"
    modification = input("Modification de la forme du sein ? ").lower() == "oui"

    resultat = moteur_inference(masse, douleur, ecoulement, modification)

    print("\n📌 RÉSULTAT DU SYSTÈME EXPERT")
    print("Niveau de risque :", resultat)

    if resultat == "RISQUE ÉLEVÉ":
        print("⚠️ Recommandation : consulter un spécialiste en urgence.")
    elif resultat == "RISQUE MODÉRÉ":
        print("ℹ️ Recommandation : effectuer des examens complémentaires.")
    else:
        print("✅ Recommandation : suivi médical régulier.")
```

Implémentation d'un SE

- **Implémentation complète en Python :**
  - Programme principal :

```
if __name__ == "__main__":
    interface_medicale()
```

  - Exemple d'exécution

```
===== SYSTÈME EXPERT : CANCER DU SEIN =====
Répondez par oui ou non

Présence d'une masse palpable ? oui
Douleur mammaire ? oui
Écoulement anormal ? oui
Modification de la forme du sein ? oui

📌 RÉSULTAT DU SYSTÈME EXPERT
Niveau de risque : RISQUE ÉLEVÉ
⚠️ Recommandation : consulter un spécialiste en urgence.
```

Implémentation d'un SE

❑ Type de raisonnement utilisé dans cette implémentation

✔ Système expert **à règles**

✔ **Chaînage avant**

✔ Raisonnement **déterministe**

✘ Pas encore d'incertitude (extension possible)

❑ Extensions possibles :

Vu notre intérêt pour **IA et l'imagerie médicale**, ce système peut être enrichi par :

◈ **Raisonnement incertain :**

✔ facteurs de certitude (CF)

✔ logique floue sur les symptômes

Implémentation d'un SE

- **Imagerie médicale :**
  - ✔ entrée = résultat mammographie / IRM
  - ✔ sortie = probabilité de malignité
- **Deep Learning :**
  - ✔ CNN pour extraire les caractéristiques
  - ✔ système expert pour l'aide à la décision finale
- ❖ Enfin, Ce système expert montre l'utilisation du raisonnement symbolique pour l'aide à la décision médicale dans le cadre de la détection précoce du cancer du sein.

Conclusion

- Les SE constituent l'une des premières et des plus importantes réalisations de l'IA symbolique. Ils ont permis de démontrer qu'il est possible de **capturer le savoir d'un expert humain**, de le formaliser sous forme de règles, puis de l'exploiter à l'aide d'un **moteur d'inférence** afin de résoudre des problèmes complexes de manière cohérente, explicable et reproductible.
- Les SE constituent l'un des domaines de l'IA qui ont trouvé des applications dans le monde industriel. Les SE ont comme objectif la modélisation puis la simulation du savoir et du savoir-faire d'un expert (ou des experts) dans un domaine spécifique.

Conclusion

- Un SE est composé de deux parties complémentaires : une base de connaissance et un moteur d'inférence, et il se caractérise par la séparation entre les connaissances et le raisonnement.
- Tout au long de ce cours, nous avons étudié les **fondements théoriques** des SE, notamment la représentation des connaissances, la base de faits (BF), la base de règles (BR), ainsi que les mécanismes de raisonnement tels que le **chaînage avant** et le **chaînage arrière**. Ces mécanismes montrent comment un système peut raisonner soit à partir des données disponibles, soit à partir d'objectifs à atteindre, en imitant le raisonnement logique humain.

Conclusion

- Nous avons également mis en évidence les **limites du raisonnement déterministe**, ce qui a conduit à l'introduction du **raisonnement incertain**, à travers les facteurs de certitude, la logique floue et les approches probabilistes. Ces extensions permettent aux systèmes experts de mieux gérer l'imprécision, l'incertitude et l'incomplétude des informations, en particulier dans des domaines sensibles comme la médecine, la finance ou l'aide à la décision.
- D'un point de vue pratique, l'exemple d'implémentation en Python a montré que les SE ne sont pas seulement des concepts théoriques, mais des **outils logiciels concrets**, intégrables dans des applications réelles.

Conclusion

- Pour l'étudiant en Génie Logiciel, cela renforce des compétences essentielles telles que la modélisation des connaissances, la conception de systèmes décisionnels, la structuration du raisonnement et la validation des règles métier.
- les SE traditionnels aient été partiellement supplantés par les approches modernes d'apprentissage automatique et d'apprentissage profond, ils demeurent **hautement pertinents**. Leur capacité à fournir des **explications claires des décisions** et à intégrer l'expertise humaine les rend complémentaires aux modèles statistiques et aux réseaux de neurones.

Conclusion

- En conclusion, les SE représentent un socle fondamental de l'IA, indispensable à la formation de tout ingénieur logiciel.
- Ils offrent une compréhension approfondie du raisonnement artificiel et constituent une base solide pour aborder des systèmes hybrides combinant IA symbolique et IA connexionniste, ouvrant ainsi la voie à des solutions intelligentes plus robustes, interprétables et éthiquement responsables.

