

## Problématique

La sécurité est l'un des aspects les plus critiques pour la gestion de la construction. Les accidents peuvent entraîner un coût dramatique ainsi qu'un faible moral; Par conséquent, la pratique industrielle et la recherche universitaire mettent l'accent sur la gestion de la sécurité des projets de construction. [1]

Malheureusement, le taux d'accidents dans l'industrie de la construction est très élevé par rapport à d'autres industries. Par conséquent, l'évaluation des risques a été utilisée pour la prise de décision de la gestion de la sécurité, comme la confirmation de l'importance relative et la possibilité de risques, fournissant une base consolidée pour la planification stratégique.[2]

Les méthodes subjectives fondées sur des avis d'experts et des méthodes objectives fondées sur l'analyse réelle des données sont les deux types de méthodes normales d'évaluation des risques pour la sécurité. Dans de nombreuses études, les approches subjectives sont utilisées pour l'évaluation des risques.[3]

L'avis d'expert est l'une des approches les plus répandues pour aborder les risques.

De nombreux chercheurs utilisent des opinions subjectives des experts pour évaluer les risques de la construction, tels que la matrice d'évaluation des risques ,Check-list et ainsi de suite.

Cependant, les différents experts peuvent avoir différents problèmes sur les descriptions subjectives. Par exemple, "très possible d'arriver" et "possible d'arriver", il s'agit de deux descriptions sur la possibilité de risques que chaque expert peut avoir des normes différentes lors de l'évaluation des risques. Bien que certains chercheurs aient essayé d'éviter ce problème en utilisant des méthodes scientifiques tout en étudiant[4], cependant, les méthodes

d'évaluation basées sur des données réelles sont plus objectives et persuasives. Néanmoins, des enregistrements de sécurité tels que des pertes proches , Les blessures, même la fatalité ne sont pas facilement obtenues et donc peu d'évaluations des risques liés à la sécurité sont basées sur des données réelles[1]. Les méthodes objectives ne sont utilisées que lorsqu'une base de données de statistiques d'accidents de haute qualité est accessible. Par exemple, Aneziris (2008) et apazoglou (2007) ont établi un modèle d'évaluation objectif selon la base de données sur les accidents de la sécurité et de la santé au travail des Pays-Bas entre 1998 et 2004 [2].

Aujourd'hui, il n'est toujours pas facile d'obtenir une base de données complète sur les accidents de sécurité. En fait, il est important de tenir compte à la fois des évaluations subjectives des avis d'experts et des évaluations objectives de la base de données des accidents lors de l'évaluation des risques. Jusqu'à présent, il n'existe aucune méthode pour résoudre ce problème.[4]

Cette étude développe une nouvelle approche d'évaluation basée sur le réseau bayésien. Les opinions d'experts et les données réelles peuvent être incorporées par cette approche.

Les relations entre les événements de risque de sécurité, les paramètres de risque et les facteurs de risque peuvent être modélisés en tant que réseau compliqué. Les réseaux bayésiens ont été largement mis en œuvre pour la recherche universitaire au cours de la décennie récente, est un modèle graphique probabiliste qui représente un ensemble de variables aléatoires et leurs dépendances conditionnelles par un graphe acyclique dirigé [5] pour développer une construction de raisonnement sur des connaissances incertaines, Traitant spécifiquement de l'incertitude résultant de diverses contraintes conditionnelles[6].

Il est également utilisé pour développer un réseau pour évaluer un modèle de relation compliqué consistant en des événements de risque et des facteurs de risque.[7]  
Les réseaux bayésiens sont largement utilisés dans des domaines tels que l'écologie, l'environnement, l'économie, La géologie, la sécurité et ainsi de suite [8] [11] [12]

Le réseau bayésien est également utilisé pour l'évaluation des risques de la construction. Martin et al. (2009) ont identifié les principaux facteurs de risque de chutes sur le chantier de construction à partir d'études antérieures et utilisent des réseaux bayésiens pour modéliser les risques de choc en les reliant à des facteurs de risque [9]. Ils ont également identifiés les risques les plus importants à différents niveaux. Matias et al. (2008) ont évalué la précision de la prévision des risques en utilisant les réseaux bayésiens par rapport à d'autres approches [10]. Ils ont conclu que le réseau bayésien avait les avantages suivants:

- 1) Ils simulent des risques dans différentes conditions et réalisent l'analyse de probabilité sur chaque variable simultanément
- 2) Ils peuvent être utilisés pour construire un modèle avec des variables qualitatives discrètes (par exemple, toutes sortes de paramètres concernant un accident)
- 3) Ils prédisent plus précisément la probabilité de risque.

*Chapitre I*  
*Evaluation des risques*

## INTRODUCTION

L'évaluation des risques n'est pas un sujet nouveau.

Une évaluation des risques est une enquête systématique de tous les risques liés aux postes de travail, aux équipements de travail et aux salariés

## NOTIONS

Il est important de différencier les notions de DANGER, de RISQUE et de FACTEURS DE RISQUES. Le risque n'est pas un danger: il en est la conséquence s'il y a exposition au danger.

**DANGER:** Un danger est une propriété ou une capacité d'un objet, d'une personne, d'un processus... pouvant entraîner des conséquences néfastes, aussi appelés dommages.  
Un danger est donc une source possible d'accident.

**RISQUE:** Le risque est la probabilité que les conséquences néfastes, les dommages, se matérialisent effectivement.  
Un danger ne devient un risque que lorsqu'il y a exposition et donc, possibilité de conséquences néfastes.

**EXPOSITION:** Dans le présent contexte, quand on parle d'exposition, il s'agit du contact entre le danger et une personne, pouvant dès lors entraîner un dommage.  
Sans exposition, pas de possibilité de dommage.  
Le risque est donc la probabilité que quelqu'un soit atteint par un danger.

**FACTEURS DE RISQUES:** Les facteurs de risques sont des éléments qui peuvent augmenter ou diminuer la probabilité de survenance d'un accident ou la gravité d'un événement.  
Les facteurs de risques complètent l'équation:

### **RISQUE = DANGER X EXPOSITION**

Il faut donc bien faire la distinction entre les notions de risque et d'exposition et la notion de danger.

Prenons par exemple un DANGER (un couteau), un RISQUE (risque de coupure lors de l'utilisation du couteau) et un FACTEUR DE RISQUE (le fait de ne pas porter de gants).  
Ce n'est pas l'absence de gants qui blesse, mais le couteau, et le fait d'utiliser le couteau sans gants augmente le risque. [11]

## EVALUATION DES RISQUES EXPLICATIONS

Si une évaluation des risques n'a pas été réalisée, un processus convenable de gestion des risques ne pourra être mis en place et les mesures appropriées de prévention ne pourront être adoptées. De plus, les mesures de prévention mises en place suite à une évaluation des risques peuvent servir à diminuer les coûts engendrés par les accidents et les maladies professionnelles.

S'y ajoute qu'une évaluation des risques appropriée s'avérera avantageuse pour les entreprises, vu que les coûts engendrés par les accidents et les maladies seront diminués, de même que le taux d'absence pour cause de maladie. Des salariés en bonne santé sont plus productifs et efficaces et peuvent ainsi mieux contribuer à la compétitivité des entreprises. L'évaluation des risques mène donc aussi à une meilleure organisation de l'entreprise, ce qui signifie un gain de productivité et une augmentation de la qualité.

Il va de soi que dans toutes les étapes de l'évaluation des risques, la concertation avec les salariés concernés reste un point important à ne pas négliger.

L'information, la formation ainsi qu'une bonne instruction jouent un rôle majeur.

### **Qu'est-ce que l'évaluation des risques?**

Comme le nom l'indique, il s'agit d'un processus permettant d'évaluer les risques pour garantir la sécurité et la santé des salariés sur leur lieu de travail. Cependant, il faut faire la différence entre les termes "analyse des risques", où il s'agit simplement de "dépister" les risques, et "évaluation des risques", évaluation qui permet de classer les risques selon un degré d'importance. L'évaluation des risques est un examen systématique de tous les aspects du travail.

Elle sert à établir:

- les causes potentielles d'accidents (et/ou de blessures) ou de maladies;
- les possibilités d'élimination de dangers.
- les mesures de prévention ou de protection à mettre en place pour maîtriser les risques.

Lorsqu'un risque a pu être identifié, la première chose à faire est de voir si ce risque peut être éliminé. Si une élimination du risque s'avère impossible, le risque devra être maîtrisé, c'est-à-dire réduit à un minimum et gardé sous contrôle.

### **L'importance de l'évaluation des risques**

L'évaluation des risques est le processus consistant à évaluer les risques pesant sur la sécurité et la santé des salariés du fait des dangers présents sur le lieu de travail.

L'évaluation des risques est la première étape du processus de gestion des risques qui permet de faire comprendre aux personnes concernées, employeur et salariés, quelles sont les mesures à prendre afin d'améliorer la sécurité et la santé sur le lieu de travail.

## L'ÉVALUATION DES RISQUES EN 5 ÉTAPES

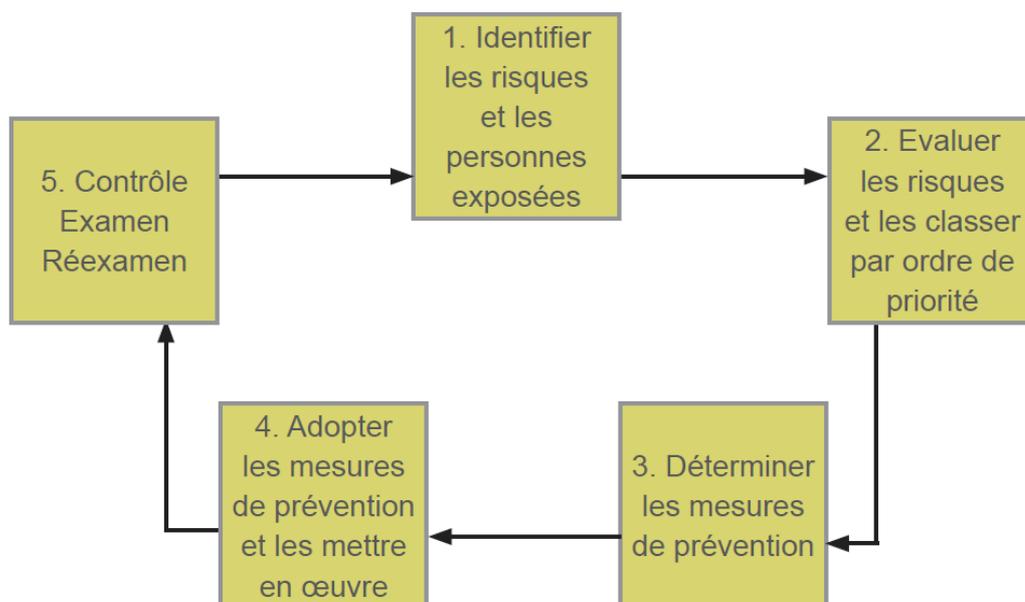


Figure1 : Les 5 étapes d'évaluation des risques

1. Identifier les risques et les personnes exposées
2. Evaluer les risques et les classer par ordre de priorité
3. Déterminer les mesures de prévention
4. Adopter les mesures de prévention et les mettre en œuvre
5. Contrôle Examen Réexamen

### Étape 1: Identification des risques et des personnes exposées

Cette étape consiste à dépister sur le lieu de travail les sources possibles d'accidents et à identifier les personnes qui peuvent y être exposées.

Il faut donc se rendre sur le lieu de travail et y repérer les éléments pouvant engendrer un dommage, car aussi longtemps qu'un danger n'est pas repéré, le risque y afférent ne pourra être ni analysé, ni géré.

De plus, pour chacun des dangers, il faut identifier les personnes menacées. Il ne suffit pas d'identifier les personnes directement exposées au danger, mais également celles qui sont indirectement exposées.

Outre les personnes actives sur un lieu de travail, il faut également considérer les groupes de personnes pouvant entrer en contact quelconque avec le danger, comme par exemple les salariés d'un autre secteur devant passer par ce lieu de travail ou encore les personnes faisant partie de l'équipe de nettoyage, etc.

S'y ajoutent des groupes de personnes plus susceptibles d'être menacés, tels que les jeunes travailleurs, les travailleurs intérimaires sans formation spécifique, les travailleurs handicapés, les femmes enceintes et allaitantes, les salariés convalescents, etc.

## Etape 2: Evaluer les risques et les classer par ordre de priorité

Dans cette deuxième étape, on évalue les risques liés à chaque danger.

On vérifie donc à quel niveau le salarié est exposé au danger. Il faut évaluer dans quelle mesure le danger peut provoquer un accident ou une maladie, le niveau de gravité de cet accident ou de cette maladie et la fréquence à laquelle les salariés y sont exposés.

Une évaluation des risques s'avérera toujours difficile car elle est toujours sujette à une interprétation subjective qui peut mener soit à une surestimation, soit à une sous-estimation du risque.

Pour remédier à la subjectivité d'une analyse individuelle, on peut recourir à différentes méthodes ou stratégies ou encore faire effectuer l'analyse par un travail en groupe.

(Méthodes de l'évaluation des risques: méthodes KINNEY, HEEPO, CHECK LIST...)

## Etape 3: Déterminer les mesures de prévention

La troisième étape consiste à déterminer les mesures afin d'éliminer les risques ou, au moins, à les maîtriser. Il faut pouvoir déterminer si un risque peut être éliminé complètement ou dans le cas contraire mettre en place des mesures de façon à le contenir et s'assurer qu'il ne compromet pas la sécurité et la santé des salariés.

Il faut également tenir compte du fait que les risques détectés peuvent s'additionner ou combiner leurs effets. Il est important de prendre en compte le résultat de l'évaluation des risques et de classer les mesures par ordre de priorité, de manière à appliquer en premier lieu les mesures de prévention qui sont les plus efficaces.

Les principes généraux sont:

1. éviter / écarter le risque;
2. s'adapter au progrès technique;
3. améliorer le niveau de protection.

**Important:** les mesures de prévention ne doivent en aucun cas avoir pour effet le déplacement du risque ou la création d'un nouveau risque.

## Etape 4: Adopter les mesures de prévention et les mettre en œuvre

La quatrième étape consiste à mettre en œuvre les mesures de prévention déterminées auparavant.

Il va de soi que toutes les mesures ne pourront être mises en œuvre simultanément: il faut donc établir un ordre de priorité en tenant compte de la gravité du risque et de ses conséquences.

Il faut aussi déterminer les personnes pouvant s'occuper de la mise en œuvre, le temps que cela va prendre et déterminer un délai de mise en œuvre.

Parmi les mesures à réaliser, on pourra ainsi distinguer:

- les mesures applicables de suite et à moindres frais;
- les mesures provisoires à mettre en place en attendant les mesures applicables à plus long terme et plus coûteuses;

-les mesures applicables à terme et représentant des frais plus élevés.

Pour l'application de certaines mesures, une planification et un certain budget sont à prévoir au préalable.

## **Etape 5: Contrôle - Examen - Réexamen et Enregistrement**

Après que les mesures de prévention aient été mises en œuvre, il faut contrôler si elles ont été exécutées et si les délais d'exécution des mesures ont été respectés.

Il s'agit non seulement de vérifier si les risques ont pu être éliminés ou écartés entièrement ou s'ils ont pu être diminués de façon à pouvoir les maîtriser mais aussi si aucun nouveau risque n'a été créé suite à l'application des mesures.

De plus, il est recommandé de réaliser régulièrement une nouvelle évaluation des risques, afin de déterminer si les risques ont bien pu être éliminés définitivement ou si d'autres risques sont apparus depuis la dernière évaluation.

Il est indispensable d'effectuer à nouveau une évaluation des risques chaque fois qu'il y a eu un changement dans l'entreprise. Ce changement peut se situer au niveau organisationnel, au niveau du personnel ou être de nature technique. Il peut s'agir, par exemple, de la création d'un nouveau poste de travail, l'engagement de nouveaux salariés, l'installation d'une nouvelle machine, l'introduction d'un nouveau procédé ou l'introduction d'un nouveau produit.

Finalement, avoir enregistré l'évaluation des risques est toujours avantageux lors des contrôles et des examens. Un bon enregistrement peut servir en tant que:

- base pour les réexamens et les évaluations des risques à venir;
- preuve destinée aux organismes de contrôle;
- information à transmettre aux personnes concernées.

Afin de bien servir de base pour des évaluations futures, il est recommandé que l'enregistrement contienne:

- les noms et fonctions des personnes effectuant les contrôles et examens;
- la date du contrôle;
- les risques qui ont pu être dépistés;
- les groupes de personnes pouvant être menacés par les risques dépistés;
- les mesures de prévention mises en œuvre;
- les informations concernant des contrôles et examens futurs;
- les informations concernant la participation des travailleurs dans l'évaluation des risques. [12]

## **LES DIFFERENTES CATEGORIES DE RISQUES [13]**

Il faut noter que la liste des risques présentés aux pages suivantes n'est pas exhaustive et qu'il va de soi qu'un nombre important d'autres risques peut se présenter sur les lieux de travail.

Les différentes catégories de risques suivantes servent d'exemple.

I. Chutes

II. Chutes d'objets

III. Circulation

IV. Manutention manuelle

V. Engins de manutention

VI. Incendie / Explosion

- VII. Risques biologiques
- VIII. Risques chimiques
- IX. Risques physiques
- X. Risques liés à l'électricité
- XI. Travail sur écran
- XII. Equipements de travail
- XIII. Equipements sous pression
- XIV. Autres risques

## **I. CHUTES**

Chutes de hauteur / chutes de plain-pied.

Risque d'accident résultant du contact brutal d'une personne avec le sol ou avec une autre surface suffisamment large et solide.

### **Identification**

- Travail en hauteur
- Déplacements à pied

### **Modalités d'exposition**

- Déplacement sur un sol glissant et/ou encombré, déformé
- Déplacement sur un sol en dénivelé
- Travail en arête de chute (bordures de vide, quais de chargement, toits, terrasses, fenêtres, etc.)
- Accès à des parties hautes (rayonnages, plafonds, armoires,...)
- Utilisation d'échelles, d'échafaudages, d'escaliers, d'escabeaux,...

### **Moyens de prévention**

- Formation, information et instruction du personnel
- Signalisation des arêtes de chute
- Signalisation des sols glissants
- Signalisation des sols déformés
- Réparation des chemins de circulation en mauvais état
- Maintien de voies de circulation dégagées
- Montage des échafaudages par des personnes compétentes et selon les indications du fabricant
- Vérification de la conformité des matériels (échafaudages et échelles conformes et maintenus en bon état)
- Proscrire les moyens de fortune (chaise, table, etc.)
- Eclairage correct
- Equipements de protection collective (garde-corps, etc.)
- Equipements de protection individuelle (chaussures de sécurité antidérapantes, harnais antichute, etc.)

## **II. CHUTES D'OBJETS**

Risques d'accident résultant de la chute d'objets lors du transport ou du stockage (p.ex.: d'un étage supérieur ou de l'effondrement de matériau) et lors de travaux en hauteur.

### **Identification**

- Lieux de travail superposés
- Objets stockés en hauteur
- Objets empilés sur une grande hauteur
- Travaux effectués à des hauteurs ou étages différents
- Travaux effectués dans des tranchées, des puits, des galeries, etc.
- Transports avec un appareil de levage (grues à tour, ponts roulants, grues mobiles, etc.)

### **Modalités d'exposition**

- Travaux avec des objets pouvant tomber d'un niveau supérieur (Matériel, outils, etc.)
- Objets empilés sans être sécurisés
- Stockage sur étagères multiples
- Travaux en dénivelé, en profondeur
- Utilisation d'échelles, d'échafaudages, grues, etc.

### **Moyens de prévention**

- Formation, information et instruction du personnel
- Organisation du stockage: emplacements réservés, largeur des allées, stockage selon taille des objets, etc.
- Limiter la hauteur de stockage selon les caractéristiques des objets
- Installation de protections évitant la chute d'objets pendant des travaux sur échafaudages ou à différents niveaux
- Respect des indications de taille et de poids pour le stockage sur étagères
- Port des équipements de protection individuelle
- Protéger la charge contre la chute lors du transport avec grues
- Ne pas déplacer des charges au-dessus de personnes

## **III. CIRCULATION**

### **Circulation dans l'entreprise (interne)**

Risques d'accident résultant du heurt d'une personne par un véhicule ou d'une collision entre véhicules ou entre un véhicule et un obstacle...

## **Circulation routière (externe)**

Risque d'accident de la circulation lié au déplacement d'un salarié réalisant une mission pour le compte de l'entreprise.

### **Identification**

- Déplacement en voiture ou par un autre véhicule motorisé (p. ex. chariot élévateur) au sein de l'entreprise ou à l'extérieur pour le compte de l'entreprise.

### **Modalités d'exposition**

- Utilisation de véhicules sur voie publique ou privée
- Zones de circulation communes pour piétons et véhicules
- Zones de manœuvre
- Etat des véhicules, équipements des véhicules
- Conduite inappropriée
- Utilisation de moyens de communication pendant la conduite

### **Moyens de prévention**

- Information, formation et instruction des salariés concernés
- Respect du Code de la Route
- Signalisation appropriée sur le site de l'entreprise
- Séparation des voies de circulation pour véhicules et piétons
- Eclairage et entretien des voies de circulation
- Entretien préventif des véhicules
- Réparation immédiate des dégâts
- Planification des déplacements à l'extérieur afin de donner assez de temps au conducteur pour conduire en sécurité
- Limiter les déplacements
- Interdiction d'utiliser des moyens de communication pendant la circulation .

## **IV. MANUTENTION MANUELLE**

Risques au niveau du tronc et des membres supérieurs et inférieurs suite aux postures, efforts physiques intenses (p. ex. écrasements, chocs,...)

### **Identification**

- Dangers liés à la nature de la charge (poids, volume, forme).

### **Modalités d'exposition**

- Nombre de manipulations de la charge, de façon répétitive ou à cadence élevée
- Manutention dans un environnement particulier (état du sol, encombrements,...)

- Manutention dans une ambiance particulière (chaleur, basse température, mauvais éclairage,...)
- Manutention demandant le maintien prolongé d'une posture • Manutention difficile, contrainte posturale liée à la dimension de la charge

### **Moyens de prévention**

- Formation des salariés aux gestes et postures
- Mise à disposition d'aides mécaniques adaptées
- Aménagement des locaux
- Limitation des charges pour réduire le volume et le poids
- Intégration de moments de repos
- Organisation du poste de travail pour supprimer ou diminuer les manutentions
- Suivi médical des salariés exposés en cas de besoin

## **V. ENGIN DE MANUTENTION**

Risque d'accident lié à la manutention de charges avec des engins (Chariots élévateurs, grues, ponts-roulants, pelles mécaniques, etc.).

### **Identification**

- Dangers liés à la charge manutentionnée, au déplacement d'engins, aux moyens de manutention.

### **Modalités d'exposition**

- Collision, dérapages, renversement d'engins
- Ecrasement de personnes
- Défaillance des moyens de manutention
- Conduite sans visibilité
- Instabilité du moyen de manutention ou de la charge

### **Moyens de prévention**

- Formation du personnel sur les engins et moyens de manutention utilisés
- Moyens de manutention et accessoires conformes à la réglementation
- Utilisation de moyens de manutention adaptés aux charges et encombrements
- Utilisation des moyens de manutention selon les indications du constructeur
- Entretien préventif des engins
- Schéma et délimitation des zones de manutention
- Rendre inaccessibles les zones en dessous des charges levées
- Utilisation d'équipements de protection individuelle
- Contrôle des engins par un organisme de contrôle agréé

## **VI. INCENDIE / EXPLOSION**

Risque d'accident suite à un incendie ou à une explosion.

### **Identification**

- Présence de matériaux ou produits combustibles (p. ex. stockage de produits facilement inflammables ou explosifs, stockage de papier, etc.)
- Présence d'équipement ou d'installation pouvant générer de la chaleur (p. ex. travaux de soudage, etc.)
- Présence d'un comburant (p. ex. oxygène, produits chimiques dégageant de l'oxygène, etc.)
- Stockage de produits incompatibles

### **Modalités d'exposition**

- Toute situation de travail où se trouvent simultanément des produits/matériaux combustibles, une source de chaleur et un comburant (p.ex. air)
- Utilisation de substances facilement inflammables
- Création d'une atmosphère explosive (gaz, vapeurs, poussières, etc.)
- Mélange de produits incompatibles

### **Moyens de prévention**

- Formation, information et instruction du personnel
- Remplacement par des produits non dangereux et, si cela n'est possible, par des produits moins dangereux
- Organisation du stockage
- Organisation de l'alerte et de l'intervention des secours
- Contrôle des équipements et installations
- Signalisation et étiquetage appropriés
- Affichage des consignes de sécurité et des plans d'évacuation
- Installation d'alarmes et de moyens de détection
- Installation de moyens d'extinction
- Suppression des sources de chaleur à proximité

## **VII. RISQUES BIOLOGIQUES**

Risques d'infection, d'allergies ou d'intoxications résultant de la présence de microorganismes.

### **Identification**

Dangers liés :

- au degré de pathogénicité des agents biologiques
- aux objets coupants, tranchants et piquants
- à la libération de produits biologiques allergisants ou toxiques

- à l'incertitude face à la pathogénicité de différents agents
- aux produits dangereux pour l'environnement

### **Modalités d'exposition**

- Toute situation de travail où existe la possibilité de contamination par différentes voies (inhalation, ingestion, contact, pénétration suite à une lésion).
- Toute situation pouvant entraîner une propagation accidentelle dans l'environnement
- Travail de laboratoire sur microorganismes
- Travail en contact avec des animaux
- Contact avec des produits ou installations contaminés (p. ex. Stations d'épuration, opérations d'assainissement, digestion anaérobie (Biogasanlagen), etc.)
- Soins aux personnes en milieu hospitalier
- Travail en contact avec des produits agroalimentaires

### **Moyens de prévention**

- Information, formation et instruction des salariés
- Ventilation correcte des locaux
- Bonne gestion des déchets
- Utilisation des moyens de protection individuelle (faire porter des protections respiratoires, lunettes, gants, écran facial, etc.)
- Réduction des temps d'exposition et limiter le personnel exposé
- Procédures de décontamination
- Vaccinations et surveillance médicale des salariés concernés

## **VIII. RISQUES CHIMIQUES**

Risques d'infections, d'allergies, d'intoxications ou de brûlures.

### **Identification**

Dangers liés :

- aux propriétés physico-chimiques (produits corrosifs, comburants, explosifs ou inflammables)
- aux propriétés toxicologiques (produits irritants, nocifs toxiques, cancérogènes, mutagènes, etc.)
- aux propriétés éco-toxicologiques
- à l'incertitude scientifique sur les dangers des produits Synthétisés

### **Modalités d'exposition**

- Toute situation de travail où existe la possibilité de contamination par différentes voies (inhalation, ingestion, contact, pénétration suite à une lésion)
- Toute situation où les produits sont susceptibles de déclencher ou de propager un incendie
- Emission de gaz, poussière ou fumée

## **Moyens de prévention**

- Information, formation et instruction du personnel
- Remplacer par des produits non dangereux et, si cela n'est pas possible, par des moins dangereux
- Réduction des quantités
- Limitation du nombre de salariés exposés et du temps d'exposition
- Vérification et entretien périodique des systèmes de captage à la source
- Organisation et conditions de stockage adaptées
- Port d'équipements de protection individuelle
- Ventilation correcte des locaux
- Surveillance médicale du personnel concerné

## **IX. RISQUES PHYSIQUES**

Risques liés au bruit, aux vibrations et aux rayonnements.

### **Identification**

- Différents moyens de transport, installations, machines (bruit et vibrations)
- Présence de sources de rayonnements ionisants
- Présence de sources de rayonnements électromagnétiques
- Présence de sources de rayonnements infrarouge ou ultraviolet

### **Modalités d'exposition**

- Bruit émis de façon continue par des machines, compresseurs, outils, moteurs, etc.
- Bruit d'impulsion des machines et outils travaillant par chocs
- Exposition à une amplitude sonore trop importante
- Vibrations émises par des moyens de transport, machines et outils
- Utilisation d'appareils générant des rayonnements ionisants
- Utilisation d'appareils générant des rayonnements optiques
- Utilisation d'appareils générant des rayonnements électromagnétiques
- Utilisation de matières émettant des rayonnements ionisants (matières radioactives)
- Toute situation où il y a possibilité de contamination, d'exposition externe ou interne à des rayonnements
- Toute situation où des personnes peuvent se trouver à proximité d'une source de rayonnement

### **Moyens de prévention**

- Informer, former et instruire le personnel
- Essayer de supprimer les sources de bruit ou de vibrations
- Limiter le temps d'exposition du personnel
- Disposer les installations bruyantes dans des locaux séparés
- Installer des protections sonores
- Installer des isolations contre les vibrations

- Entretien régulièrement les machines, outils et moyens de transport
- Utiliser les moyens de protection individuelle adaptés
- Disposer de lunettes adaptées aux rayonnements
- Respecter les valeurs limites
- Classer les locaux en zones surveillées ou contrôlées
- Adapter le stockage des sources rayonnantes et déchets rayonnants
- Assurer un suivi médical du personnel exposé

## **X. RISQUES LIES A L'ELECTRICITE**

Risques d'accident résultant du contact avec des installations électriques.

### **Identification**

- Contact direct avec des éléments sous tension
- Contact indirect (arc électrique)

### **Modalités d'exposition**

- Toute situation où il y a possibilité d'électrocution ou électrisation
- Conducteurs nus accessibles aux travailleurs
- Matériel défectueux, âgé ou usé
- Non-consignation d'une installation électrique lors d'une intervention

### **Moyens de prévention**

- Information, formation et instruction du personnel
- Remplacement des équipements dangereux par des équipements non dangereux, et/ou, si cela n'est pas possible, par des équipements moins dangereux
- Contrôle et maintenance des installations
- Signalisation adaptée
- Protection ou éloignement des pièces nues sous tension
- Mise en place de consignes en cas d'intervention
- Dispositifs de coupure d'urgence
- Matériel à double isolation
- Equipements de protection individuelle adaptés
- Contrôles périodiques
- Respect des cinq règles de sécurité \*

#### **\* Les 5 règles de sécurité:**

- 1 Mise hors tension,
- 2 Protection contre la remise sous tension,
- 3 Contrôle de l'absence de tension,
- 4 Mise à la terre et court-circuit,
- 5 Séparation, isolation, protection des parties voisines sous tension.

## **XI. TRAVAIL SUR ECRAN**

Risques pour la santé sur des postes de travail non ergonomiques.

### **Identification**

- Dangers liés à la sollicitation visuelle (brillance de l'écran, distance entre l'écran et la personne, taille des caractères, etc.)
- Dangers liés à une mauvaise posture (cou, dos et membres supérieurs)
- Dangers liés à l'ambiance: éclairement, bruit, température, etc.)

### **Modalités d'exposition**

- Durée du travail sur écran
- Type du travail (saisie, dialogue, transcription)
- Organisation du travail (autonomie, pauses, etc.)
- Contraintes ergonomiques (écran, clavier, souris, table, siège, etc.)
- Eclairage mal adapté

### **Moyens de prévention**

- Formation et information du personnel
- Mode de travail autonome
- Variation des travaux
- Eclairage et sonorisation adaptés
- Adaptation de l'ergonomie du poste à l'utilisateur
- Adaptation de l'éclairage
- Pauses régulières
- Suivi médical

## **XII. EQUIPEMENTS DE TRAVAIL**

Risque d'accidents causés par l'action mécanique (coupure, perforation, etc.) d'une machine, d'une partie de machine, d'un outil portatif.

### **Identification**

- Dangers liés aux équipements et matériels en mouvement
- Dangers liés aux matériaux usinés, analysés ou traités (fluides chauds, vapeurs, poussières, copeaux, etc.)
- Dangers liés aux produits utilisés pour l'usinage, l'analyse ou le traitement de matériaux

### **Modalités d'exposition**

- Parties mobiles accessibles au personnel

- Fluides ou matières pouvant être projetés
- Utilisation d'outils tranchants
- Toutes situations au cours desquelles il y a possibilité d'écrasement, de cisaillement, de happement, de heurt, de choc, d'enroulement, etc.

### **Moyens de prévention**

- Formation et information du personnel
- Protection des organes des machines en mouvement
- Utilisation d'équipements de travail adaptés
- Vérifications périodiques
- Signalisation des éléments ou zones à risques
- Dispositifs d'arrêt d'urgence
- Aménagement du poste de travail
- Utilisation de machines et outils conformes à la réglementation
- Utilisation selon les indications du constructeur / fournisseur

## **XIII. EQUIPEMENTS SOUS PRESSION**

Risques d'accident causé par une machine, une partie de machine sous pression.

### **Identification**

- Dangers liés aux équipements et matériels en mouvement
- Dangers liés aux matériaux usinés, analysés ou traités (fluides chauds, vapeurs, poussières, copeaux, etc.)
- Dangers liés aux produits utilisés pour l'usinage, l'analyse ou le traitement de matériaux

### **Modalités d'exposition**

- Situations de libération du contenu sous pression, lors du fonctionnement, de l'ouverture, de la charge de l'appareil ou de projection d'objets sous pression

### **Moyens de prévention**

- Formation et information du personnel
- Utilisation d'équipements adaptés
- Inspections périodiques
- Entretien préventif
- Mise à disposition de consignes
- Utilisation des appareils par du personnel compétent
- Ventilation et captage des émissions à la source
- Utilisation selon les indications du constructeur/fournisseur

## **XIV. AUTRES RISQUES**

Afin de compléter la liste ci-dessus, il convient d'en citer encore quelques-uns.

Il s'agit notamment de risques liés:

- à l'expérimentation animale
- à l'utilisation de laser
- à l'utilisation de liquides cryogéniques et de gaz
- à la plongée
- à l'hygiène
- à l'organisation du travail
- à l'intervention d'une entreprise extérieure
- au tabac, à l'alcool et aux drogues
- aux différentes formes de harcèlement
- au stress

## **5 LES OUTILS DE GESTION DES RISQUES**

La méthode ou l'approche parfaite en ce qui concerne la gestion des risques n'existe pas: il faut donc faire un choix entre différentes approches (manières d'aborder le sujet) et différentes méthodes (outils) afin de savoir laquelle s'adapte le mieux aux objectifs à atteindre et aux caractéristiques de l'entreprise.

On peut combiner différentes méthodes ou les utiliser l'une après l'autre.

### **1. Exemples d'approches:**

- l'approche participative / individuelle: l'analyse des risques peut se faire par une personne seule ou par un groupe de personnes.
- l'approche généraliste / spécialisée: les méthodes d'analyse peuvent être généralistes, c.-à-d. axées sur un ensemble d'éléments ou spécialisées, c.-à-d. axées sur un élément en particulier telle qu'une machine par exemple.
- l'approche directrice / autonome: les méthodes d'analyse peuvent être directrices, comme par exemple des listes de contrôle, ou peuvent laisser une plus grande marge de manœuvre aux analystes.

### **2. Exemples de méthodes d'identification des risques:**

#### **2.1. La méthode heepo (Homme Equipement Environnement Produit Organisation):**

Cette méthode considère la situation de travail comme un système composé de différents facteurs en interaction qui doivent être pris en compte dans le travail d'identification des risques. L'utilisation de la méthode HEEPO se fait en posant systématiquement des questions calquées sur le même moule.

Cette méthode s'avère utile pour détecter et inventorier les risques et assure une réflexion plus approfondie puisqu'elle structure les éléments de manière systématique.

## **2.2. Check-list:**

Il s'agit d'un questionnaire portant sur les différentes situations, énumérant point par point des facteurs ou des situations à contrôler pour un certain poste ou équipement de travail. Une check-list peut être générale ou spécifique. Elle permet de passer en revue de manière systématique les différents points d'attention, mais elle doit être adaptée en fonction du groupe l'utilisant et de la situation à analyser.

## **2.3. Les audits:**

Il s'agit d'une radioscopie de l'élément faisant l'objet de l'analyse. L'audit peut porter sur la sécurité, l'hygiène, le bien-être ou encore la qualité et l'environnement. Il peut être effectué par un auditeur interne ou externe. Il fait généralement l'objet d'un rapport présentant le contenu et les résultats de l'analyse effectuée et pouvant contenir aussi des suggestions d'amélioration. L'audit risque cependant de refléter seulement la vision des choses de l'auditeur seul.

## **2.4. Les profils de poste:**

Il s'agit ici d'une analyse du poste de travail qui amène une réflexion globale sur le poste étudié. Cette analyse favorise une approche intégrée de la qualité du travail et porte aussi bien sur la sécurité et l'ergonomie que sur les aspects psychosociaux.

## **2.5. La méthode fmea (Failure Made and Effect Analysis):**

Cette méthode s'avère particulièrement appropriée pour la détection des risques dans les installations commandées automatiquement. Le fonctionnement potentiellement incorrect ou dangereux du système est analysé sur base du comportement potentiellement incorrect des différents composants de ce système. Ensuite, les différents composants sont analysés séparément.

# **3. Exemples de méthodes/techniques d'évaluation des risques**

## **3.1. Le tableau à 2 entrées**

Il s'agit d'une matrice qui permet de classer les événements dangereux en fonction de la gravité et de la probabilité des dommages.

C'est une méthode simple et utile pour quantifier et justifier. Elle permet de déterminer les actions prioritaires, mais pas d'analyser les causes ou de déterminer des mesures de prévention.

Le résultat de l'évaluation apparaît dans une des trois zones:

**Zone rouge** : risques inacceptables - prendre des mesures immédiatement

**Zone jaune** : risques inacceptables à long terme - prendre des mesures à court terme et chercher des mesures durables

**Zone verte** : risques “acceptables” si bonne utilisation des équipements de protection individuelle

Gravité				
Très importante Invalidité permanente				
Importante Incapacité temporaire				
Moins important Sans incapacité				
Peu importante Incident				
	Peu probable	Possible	Fort possible	A attendre
	probabilité			

Tableau 1: Tableau d'une matrice en fonction de la gravité et de la probabilité des dommages.

### 3.2. La méthode KINNEY

Selon Kinney, le risque (R) est le produit de la probabilité (P), de la fréquence d'exposition (F) et de l'effet produit (E):  $R = P \times F \times E$ .

Il associe ensuite des valeurs à ces variables.

La probabilité de survenance est cotée sur une échelle à 7 degrés:

<b>probabilité P</b>	
0,1	à peine concevable
0.2	pratiquement impossible
0.5	concevable mais peu probable
1	peu probable mais possible dans des cas limites
3	peu courant
6	tout à fait possible
10	prévisible

Tableau 2 : Tableau de probabilité P

La fréquence est évaluée sur une échelle de 6 degrés qui va de “très rare” à “continu”:

<b>fréquence d'exposition F</b>	
0.5	très rare (moins d'une fois par an)
1	rare (annuel)
2	parfois (mensuel)
3	occasionnel (hebdomadaire)
6	régulier (journalier)
10	continu

Tableau 3: Tableau de fréquence d'exposition F

L'effet produit de l'événement (conséquence) s'échelonne entre “blessure sans incapacité de travail” et “plusieurs morts”:

effet E	
1	petit blessures sans perte de temps de travail
3	important blessures avec perte de temps de travail
7	sérieux blessures irréversibles
15	très sérieux 1 mort
40	catastrophe plusieurs morts

Tableau 4 : Tableau d'effet E

score du risque R		
1	$R \leq 20$	risque très limité – "acceptable"
2	$20 < R \leq 70$	attention requise
3	$70 < R \leq 200$	mesures requises
4	$200 < R \leq 400$	amélioration immédiate requise
5	$R > 400$	cesser les activités

Tableau 5 : Tableau de score du risque R

Cette méthode permet d'obtenir une évaluation chiffrée du risque permettant de dégager aisément les priorités. Cependant, certains éléments ne sont pas pris en considération ou ne sont pas quantifiés (p.ex. l'ergonomie).

Il s'agit ici d'une méthode réservée à l'évaluation des risques liés à la sécurité des salariés et ne s'applique pas sur des éléments difficilement mesurables.

### 3.3 Analyse Préliminaire des Risques (APR):

Développée au début des années 1960 dans les domaines aéronautiques et militaire. Elle est utilisée depuis dans des nombreuses autres industries. C'est une méthode d'usage très général couramment utilisée pour l'identification des risques au stade préliminaire de la conception d'une installation ou d'un projet. En conséquence, cette méthode ne nécessite généralement pas une connaissance approfondie et détaillée de l'installation étudiée.

L'APR nécessite dans un premier temps d'identifier les éléments dangereux de l'installation, l'identification de ces éléments dangereux est fonction du type d'installation étudiée.

Il est également à noter que l'identification de ces éléments se fonde sur la description fonctionnelle réalisée avant la mise en œuvre de la méthode.

À partir de ces éléments dangereux l'APR vise à identifier pour un élément dangereux une ou plusieurs situations de danger. Dans le cadre de ce document une situation de danger est définie comme une situation qui si elle n'est pas maîtrisée peut conduire à l'exposition d'enjeux à un ou plusieurs phénomènes dangereux.

Le groupe de travail doit alors déterminer les causes et les conséquences de chacune des situations de danger identifiées puis identifier les sécurités existantes sur le système étudié. Si ces dernières sont jugées insuffisantes vis-à-vis du niveau de risque identifié dans la grille de criticité, des propositions d'amélioration doivent alors être envisagées.

### **Limites et avantages :**

Le principal avantage est de permettre un examen relativement rapide des situations dangereuses sur des installations. Elle apparaît comme relativement économique en terme de temps passé.

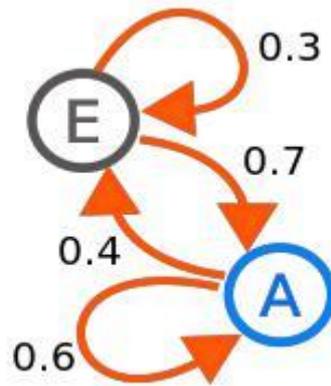
En revanche l'APR ne permet pas de caractériser finement l'enchaînement des événements susceptible de conduire à un accident majeur pour des systèmes complexes.

### **3.4 Processus de Markov :**

Un processus de Markov est un processus stochastique possédant la propriété de Markov. Dans un tel processus, la prédiction du futur à partir du présent n'est pas rendue plus précise par des éléments d'information concernant le passé. Les processus de Markov portent le nom de leur inventeur, Andreï Markov.

### **Objectif :**

L'objectif est de modéliser la dynamique d'un système réparable en présence de pannes. La méthode des processus de Markov est basée sur la représentation graphique du processus à étudier. Il s'agit d'une méthode développée pour traiter les systèmes aléatoires dynamiques ; ces systèmes passent d'état en état au bout de durées aléatoires régies par les divers phénomènes (défaillances de composants, réparations) auxquels il est soumis.



**Figure I 2:**Exemple élémentaire de chaîne de Markov, à deux états *A* et *E*

### Construction d'un modèle

Considérons un système composé de  $N$  composants, chaque composant ayant un nombre fini d'états de fonctionnement et de panne ; ce système est supposé réparable et chaque composant est réparé après constatation de la panne. Le système est donc composé :

**-Des états de fonctionnement :** un état de bon fonctionnement où tous les composants fonctionnent, et des états où certains composants sont en panne mais le système reste fonctionnel,

**-Des états de pannes :** où suffisamment de composants sont en panne pour affecter le système global.

La construction du modèle se fait en 3 étapes :

1. Recensement de tous les états du système. Si chaque composant a 2 états (ok ou panne) et si le système a  $N$  composants, le nombre maximal d'états est  $2^n$ . Au cours de la vie du système, des états de panne peuvent apparaître à la suite de défaillance ou disparaître à la suite de réparation ;
2. Recensement de toutes les transitions possibles entre ces différents états et l'identification de toutes les causes de ces transitions. Les causes des transitions sont généralement des défaillances des composants ou la réparation de composants ;
3. Calcul des probabilités de se trouver dans les différents états au cours d'une période de vie du système, calcul des temps moyens (MTTF, MTBF, MTTR . . . )

### Intérêts et limites

Lorsque le nombre d'états devient trop grand pour être appréhendé directement sans risque d'erreur, il est possible de faire appel à des outils qui, à partir d'une description par réseaux de Pétri ou de règles similaires à celles employées dans les systèmes experts, permettent de générer le processus de Markov équivalent.

Ces descriptions étant beaucoup plus condensées que celle relative au processus markovien, l'analyste en conserve la maîtrise pour des systèmes faisant intervenir un plus grand nombre de composants.

Lorsque malgré tous les regroupements possibles le nombre d'états reste trop grand, alors il faut faire appel à d'autres techniques comme la simulation de Monte-Carlo.

### 3.5 La méthode de l'espace des états :

La Méthode de l'Espace des États MEE, fondée sur les chaînes de Markov homogènes (à taux de transition constants dans le temps) décrit de manière causale et analytique l'évolution d'un système quelconque, réparable, en particulier si le nombre de réparateurs est inférieur au nombre d'entités qui le composent.

#### **Objectif :**

L'objectif est d'évaluer les principales caractéristiques de fiabilité et de disponibilité d'un système réparable.

Les états possibles d'un système (état nominal, état de fonctionnement dégradé, état de panne totale,...) sont modélisés à l'aide de cercles reliés entre eux par des flèches indiquant les transitions possibles entre ces états. Ces transitions sont conditionnées, selon les cas, par des processus de défaillance ou par des remises en état des entités en panne dont l'intensité (taux de défaillance ou taux de réparation) est indiquée. Le processus est dit markovien lorsque tous les taux de transition sont indépendants du temps.

Le schéma suivant donne un exemple de représentation d'un graphe d'état, pour un système à deux composants C1 et C2.

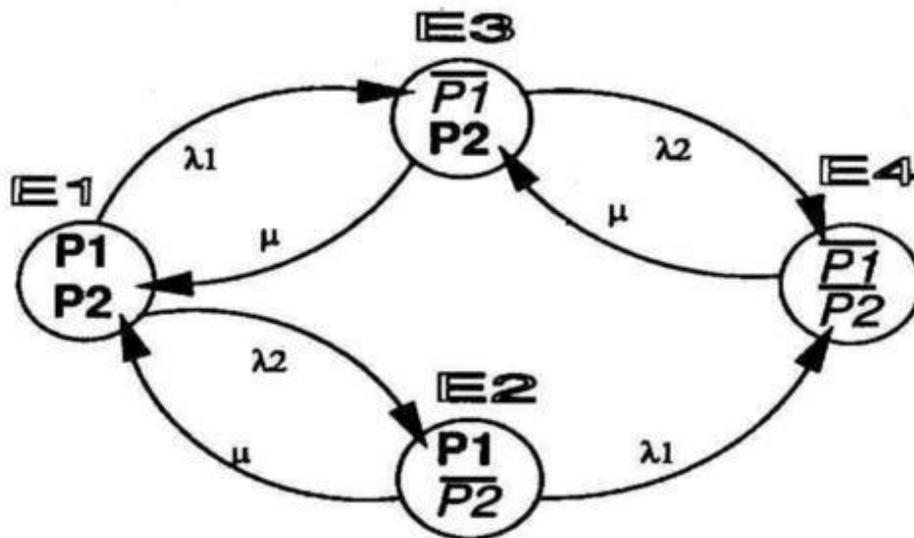


Figure I.3 :graphe d'état

Ce graphe d'état présente les quatre états du système ( $E1$ ,  $E2$ ,  $E3$  et  $E4$ ) et les transitions de passage d'un état à un autre du système.

Les notations  $P1, P2$  et  $\bar{P}2$  indiquent l'état des composants considérés  $C1$  ou  $C2$ , pour un état du système  $P1$  correspond au fonctionnement du composant  $C1$ .  $\bar{P}1, \bar{P}2$  signifie le dysfonctionnement du composant  $C1$ . De même  $P2$  et  $\bar{P}2$  désignent respectivement le fonctionnement et le dysfonctionnement du composant  $C2$ .

Les taux de transition notés  $\lambda1$  et  $\lambda2$  désignent respectivement le taux de transition de l'état  $P1$  à l'état  $\bar{P}1$ , et le taux de transition de l'état  $\bar{P}2$  à l'état  $P2$ .

Le taux de transition noté  $\mu$  correspond au passage d'un état de dysfonctionnement à un état de fonctionnement d'un des composants du système. Dans cet exemple ce taux de transition est identique pour les deux composants.

### Intérêts et limites :

Les principaux intérêts de cette méthode sont :

- La visualisation graphique des résultats,
- Le traitement possible de systèmes à éléments dépendants,
- La prise en compte possible de lois non exponentielle pour modéliser les durées de réparation.

En revanche, les principaux inconvénients sont :

- Elle est limitée aux dispositifs sans usure,
- Il est impossible de prendre en compte les événements déterministes dont la date est fixée de l'extérieur,
- Le nombre d'états du graphe croit de manière exponentielle avec le nombre d'éléments du système.

### 3.6 Réseau de Petri :

Le réseau de Petri est un modèle mathématique servant à représenter divers systèmes (informatiques, industriels...) travaillant sur des discrètes, apparu en 1962, dans la thèse de doctorat de Carl Adam Petri.

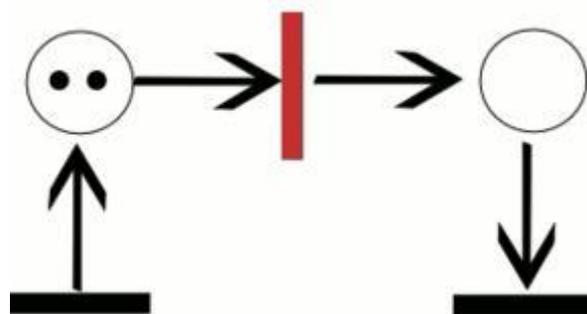
Les réseaux de Petri sont un bon outil pour modéliser le comportement dysfonctionnel d'un système. On appréhende plus aisément les différentes pannes et l'impact sur le système. Pour rappel, un réseau de Petri est un graphe orienté avec deux types de noeuds : les places (états ou conditions) représentées par des cercles et les transitions (ou événements) symbolisées par des barres.

Un réseau de Petri stochastique est un réseau étendu tel qu'on associe à chaque transition une durée de franchissement aléatoire ou déterministe (nulle ou non). Si la durée déterministe est 0, on parle de transitions immédiates.

#### Objectif :

Un réseau de pétri permet de modéliser le comportement dynamique d'un système réparable en présence de pannes. Il s'agit d'une méthode développée pour traiter les systèmes dynamiques ; ces systèmes passent d'état en état au bout de durées aléatoires régies par les divers phénomènes (défaillances de composants, réparations) auxquels il est soumis.

Ce comportement est dit « stochastique » et sa modélisation est du ressort des « processus stochastiques ».



**Figure I.4:**Exemple d'un réseau de Petri *Place-Transition*

composé de :

- **Deux places**, les cercles
- **Trois transitions**, les traits noirs
- **Quatre arcs**, les flèches
- **Deux jetons**, les points noirs qui circulent de gauche à droite

## **Intérêts et limites :**

Bien que le nombre d'états engendrés par un réseau de Pétri soit dénombrable, il n'est pas forcément fini. Dès que le système étudié est complexe, le nombre d'états engendrés est important et il n'est plus possible de tous les identifier. Cette méthode ne peut être utilisée pour générer un graphe de Markov que lorsque le nombre d'états n'est pas trop grand (jusqu'à quelques milliers). La représentation par réseaux de Pétri étant beaucoup plus condensée que celle des processus de Markov, elle est alors plus facile à maîtriser.

## **3.7 Simulation de Monte Carlo :**

La simulation Monte Carlo est une technique mathématique informatisée qui permet de tenir compte du risque dans l'analyse quantitative et la prise de décision. Les professionnels de domaines aussi diversifiés que la finance, la gestion de projet, l'énergie, la production, l'ingénierie, la recherche et le développement, les assurances, l'industrie du gaz et du pétrole, les transports et l'environnement, ont recours à cette technique.

Les scientifiques chargés de la recherche sur la bombe atomique ont été les premiers à utiliser la technique, baptisée Monte Carlo d'après la célèbre ville monégasque et ses casinos. Depuis son inauguration durant la Deuxième Guerre mondiale, la simulation Monte Carlo a servi à modéliser toute une variété de systèmes physiques et conceptuels.

## **Objectif :**

La simulation Monte Carlo procède à l'analyse du risque par élaboration de modèles de résultats possibles, en substituant une plage de valeurs, une distribution de probabilités à tout facteur porteur d'incertitude. Elle calcule et recalcule ensuite ces résultats selon, à chaque fois, un ensemble distinct de valeurs aléatoires des fonctions de probabilités. Suivant le nombre d'incertitudes et les plages spécifiées pour les représenter, une simulation Monte Carlo peut impliquer, pour être complète, des milliers ou même des dizaines de milliers de calculs et recalculs. La simulation produit des distributions de valeurs d'issue possibles.

La simulation de Monte-Carlo constitue une méthode très intéressante car elle donne accès à de nombreux paramètres inaccessibles par les autres méthodes et conduit à des analyses extrêmement détaillées des systèmes étudiés :

Elle n'est pas limitée par le nombre d'états du système étudié car, même s'il y en a des centaines de milliers, seuls les états prépondérants se manifestent au cours de la simulation,

Elle permet la prise en compte de n'importe quelle loi de probabilité,

Elle permet l'association dans le même modèle de phénomènes déterministes et de phénomènes aléatoires,

Son implémentation informatique est aisée.

### **Intérêts et limites :**

L'augmentation de la puissance des moyens informatiques permet d'appliquer aisément cette méthode.

### **3.8 Méthode Nœud Papillon**

Le concept du nœud papillon a été introduit par la compagnie ICI (Imperial Chemical Industries). Après l'accident survenu sur la plate-forme pétrolière Piper Alfa, la compagnie Royal Dutch/Shell a développé cette technique d'analyse au début des années 1990 afin d'améliorer la sécurité sur de telles installations. L'utilisation de la méthode du nœud papillon tend aujourd'hui à se démocratiser et son application au secteur de l'industrie est de plus en plus répandue.

Le nœud papillon est une méthode d'analyse de risques qui consiste à réunir autour d'un même événement redouté un arbre de défaillances et un arbre d'événements. Cette méthode présente comme principal avantage de fournir une arborescence synthétique qui permet d'avoir une vision exhaustive de l'ensemble des séquences accidentelles susceptibles de se produire.

### **Objectif**

Cet outil permet d'illustrer le résultat d'une analyse de risque simple ou détaillée (de type APR, AMDEC, HAZOP, What-if ou autres) et d'y superposer les barrières de sécurité (prévention et protection). Ainsi, c'est un outil grandement efficace pour communiquer les résultats d'une analyse des risques à diverses parties prenantes incluant le grand public et la haute direction des organisations; deux groupes d'intervenants avec lesquels il est crucial de synthétiser et de vulgariser l'information à communiquer.

Il est de visualiser concrètement des scénarios d'accidents qui pourraient survenir en partant des causes initiales de l'accident jusqu'aux conséquences au niveau des cibles identifiées. Le « Nœud Papillon » est une approche de type arborescente largement utilisée dans les pays européens comme les Pays-Bas qui possèdent une approche probabiliste de la gestion des risques. Le Nœud Papillon est utilisé dans différents secteurs industriels par des entreprises comme SHELL qui a été à l'origine du développement de ce type d'outils.

Le nœud papillon est un outil qui combine un arbre de défaillance et un arbre d'événement.

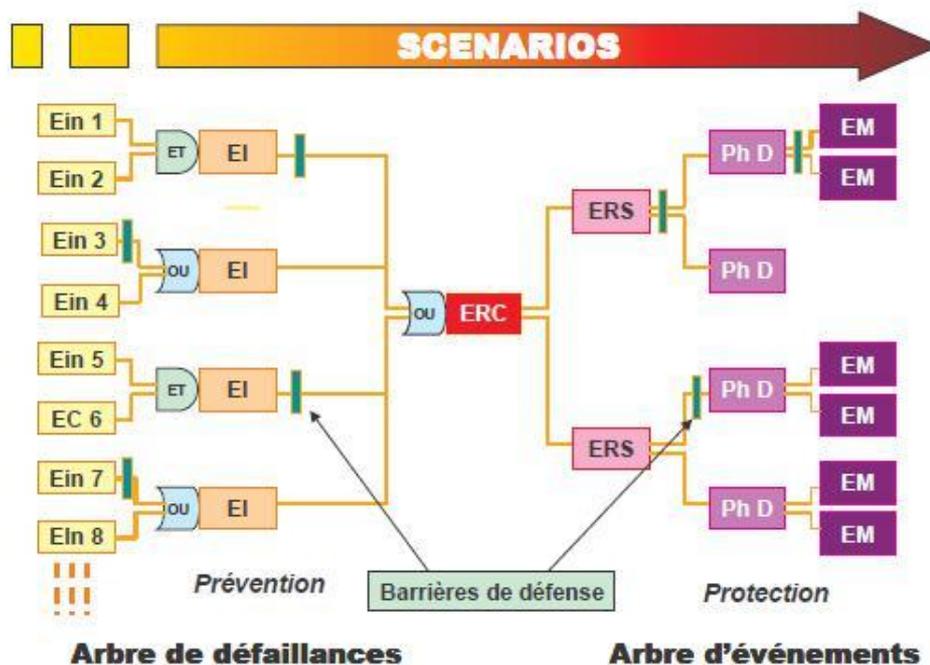


Figure I.5 :Représentation de scénarios d'accident selon le modèle du nœud papillon.

Désignation	Signification	Définition	exemple
EIn	Événement indésirable	Dérivé ou défaillance sortant du cadre des conditions d'exploitation usuelle définies	Le sur remplissage ou départ d'incendie a proximité d'un équipement
EC	Événement	Événement admis survenant de	Les actions de test, de

	courant	façon récurrente dans la vie	maintenance ou
		d'une installation	généralement des évènements courants.
EI	Evénement initiateur	Cause directe d'une perte de confinement ou d'intégrité physique	La corrosion, l'érosion, les agressions mécaniques, une montée en pression sont généralement des évènements
ERC	Evénement redouté central	Perte de confinement sur un équipement dangereux ou perte d'intégrité physique d'une substance dangereuse	Rupture, Brèche, Ruine ou Décomposition d'une substance dangereuse dans le cas d'une perte d'intégrité physique
ERS	Evénement redouté secondaire	l'événement redouté secondaire caractérise le terme	Formation d'une flaque ou d'un nuage lors d'un rejet d'une substance

			diphasique source de l'accident
Ph D	Phénomène dangereux	Phénomène physique pouvant engendrer des dommages majeurs	Incendie, Explosion, Dispersion d'un nuage toxique
EM	Effets majeurs	Dommages occasionnés au niveau (personnes, environnement ou biens) par les effets d'un	Effets létaux ou irréversibles sur la Synergies d'accident dangereux
Barrières ou mesures de prévention		Barrières ou mesures visant à prévenir la perte de confinement ou	Peinture anticorrosion, Coupure Prévention automatique des opérations de d'intégrité physique dépotage sur détection d'un niveau très haut...
Barrières ou mesures de protection		Barrières ou mesures visant à limite les conséquences de la perte de confinement ou d'intégrité physique	Vannes de sectionnement automatiques asservies à une détection (gaz, pression, débit), Moyens d'intervention...

## **Tableau I.6:** Légende des évènements figurant sur le modèle du noeud papillon

### **Déroulement :**

Le nœud de papillon s'inspirant directement des arbres des défaillances et d'événements, doit être élaboré avec les mêmes précautions.

S'agissant d'un outil relativement lourd à mettre en place, son utilisation est généralement réservée à des événements jugés particulièrement critiques pour lesquels un niveau élevé de démonstration de la maîtrise des risques est indispensable.

En règle générale, un nœud de papillon est construit à la suite d'une première analyse des risques menée à l'aide de méthodes plus simples comme l'APR ou l'hazop par exemple.

### **Intérêts et limites :**

Le Nœud Papillon offre une visualisation concrète des scénarios d'accidents qui pourraient survenir en partant des causes initiales de l'accident jusqu'aux conséquences au niveau des cibles identifiées. De ce fait, cet outil met clairement en valeur l'action des barrières de sécurité s'opposant à ces scénarios d'accidents et permet d'apporter une démonstration renforcée de la maîtrise des risques. En revanche, il s'agit d'un outil dont la mise en œuvre peut être particulièrement coûteuse en temps. Son utilisation doit donc être décidée pour des cas justifiant effectivement un tel niveau de détail.

### **3.9 Les réseaux Bayésien :**

Les réseaux bayésiens [14], sont des modèles graphiques interprétés à partir de systèmes experts probabilistes pour représenter des relations qualitatives et quantitatives entre plusieurs variables au travers de dépendances et de probabilités conditionnelles. Ils sont encore peu connus et utilisés en fiabilité mais tendent à émerger pour répondre à des problématiques d'optimisation des politiques de maintenance.

## CONCLUSION

L'évaluation des risques est un outil pour l'employeur, afin que ce dernier puisse garantir la sécurité et la santé des salariés sur leurs postes de travail.

Le but de l'évaluation des risques est d'éliminer, d'écarter ou du moins de diminuer les risques existants et de déterminer les mesures indispensables afin de garantir la sécurité et la santé des salariés sur leurs postes de travail.

# *Chapitre II*

## *Les réseaux bayésiens*

## **I. Introduction :**

Dans le chapitre précédent, nous avons présenté une notion générale sur évaluation. Nous avons également présenté quelques outils d'évaluation mathématique et informatique. Dans ce cas nous avons choisi les réseaux bayésiens, possèdent un fort potentiel puisqu'ils sont capables de combiner l'aspect statistique, probabiliste, avec des aspects décisionnels, et des aspects de gestion de connaissances. Ce chapitre est une synthèse sur les réseaux bayésiens : il présente les principales définitions et les principaux théorèmes formant la base de ce domaine. Et en plus la représentation de la méthode HEMP permettant de construire le modèle Bayésien.

## **II. Etat de l'art :**

La recherche bibliographique entreprise pour dresser l'état de l'art a mis en évidence un nombre important de publications scientifiques, proposant des approches à base de réseaux bayésiens pour l'analyse des risques, la sûreté de fonctionnement des systèmes, le diagnostic ou la maintenance.

P WEBER, M SUHNER [16] se sont intéressés à l'utilisation des Réseaux Bayésiens Orientés Objet (RBOO) pour la modélisation de processus industriels, Cette communication propose une méthode de construction d'un modèle d'aide à la décision à partir des analyses SADT et AMDEC afin d'aider l'utilisateur à décrire le modèle, à remplir les TPC et à exploiter les résultats, dont le but est l'évaluation de la performance globale d'un processus manufacturier dès sa mise en œuvre et au cours de son exploitation.

T AGGAB [15], il s'agit de l'évaluation prévisionnelle de la sûreté de fonctionnement d'un système industriel utilisé dans un contexte de maintenance dynamique.

M HOUHOU [17], a utilisé les réseaux Bayésien pour modéliser un système mécanique. Il s'appui sur un arbre de défaillance facile à construire pour exploiter la masse de données existantes. Ce qui permet d'évaluer à partir de la connaissance d'un état présent un état avenir.

L BOUCHAALA et S JARBOUI [18]: Application des Réseaux Bayésiens à la Modélisation et la Planification des Réseaux ; Le travail présente un outil de planification des réseaux de communications longues distances basé sur les performances des réseaux bayésiens.

G MEDINA-OLIVA, P WEBER et B IUNG [19] se sont intéressés à l'utilisation à la modélisation, à base de Réseaux Bayésiens, d'un système de maintenance industriel et de son environnement pour l'évaluation de ses stratégies de maintenance.

A PASANISI et E PARENT [20] se sont intéressés à la Modélisation bayésienne du vieillissement des compteurs d'eau par mélange de classes d'appareils de différents états de dégradation.

Dans le domaine du diagnostic, on retrouve beaucoup d'étude avec de approches par réseaux Bayésiens.

Ainsi S VERRON [21], dans sa thèse a étudié les différentes méthodologies proposées dans la littérature dans le contexte du diagnostic, ce qui lui a permis de faire un classement selon trois catégories, à savoir : défauts de capteurs, exploitation des données de fautes, exploitation des données de fonctionnement normal. C'est l'intégration de la possibilité d'avoir plusieurs modalités par les réseaux Bayésiens.

L'utilisation des réseaux bayésiens dans une approche statiques et dynamiques dans le domaine de la localisation des défaillances (diagnostic) et de l'anticipation ou de la prédiction des éventuelles dégradations pouvant affecter un système dynamique K MEDJAHER, A MECHRAOUI et N ZERHONI [22].

M.-F BOUAZIZ, E ZAMAÏ et S HUBAC [23] leurs contribution réside dans la proposition d'une méthodologie progressive permettant de développer un modèle de prédiction de l'état de santé d'un équipement de fabrication dans des contextes complexes et incertains, basée sur une approche probabiliste par réseaux Bayésiens.

A BOUCHIBA [24] propose une approche bayésienne pour l'évaluation de dysfonctionnement des systèmes complexes « cas du système ferroviaire ».

### **III. Les réseaux bayésiens :**

#### **III.1. Généralités :**

Les approches fondées sur le conditionnement et la formule d'inversion de Bayes sont appelées approches bayésiennes. Le nom de Réseaux Bayésiens est donné par cohérence avec cette appellation. D'autres noms existent également pour ces modèles : *les réseaux de croyance* (belief networks), *les modèles graphiques probabilistes orientés* (probabilistic oriented graphical models), *les réseaux probabilistes* (probabilistic networks), ou encore *les réseaux d'indépendances probabilistes* [24].

Ce réseau a été initié tout d'abord dans le domaine de l'intelligence artificielle, puis élargi dans les autres domaines scientifiques, en particulier dans le domaine de sûreté de fonctionnement pour la gestion des événements incertains, la détection et le diagnostic des défaillances des systèmes de procédés, etc.

Les recherches et développements apportés aux Réseaux Bayésiens au cours de ces dernières années, portent principalement sur trois points essentiels : les algorithmes d'inférence, l'apprentissage de la structure du réseau et l'apprentissage des paramètres du réseau [24].

En dehors de toute considération théorique, les aspects suivants des réseaux Bayésiens les rendent, dans de nombreux cas préférables :

##### **a) Acquisition des connaissances :**

Possibilité de rassembler et de fusionner des connaissances de diverses natures dans un même modèle : Retour d'expérience (données historiques ou empirique), expertise (règles logiques de statistiques ou de probabilités), ou tout simplement d'observations.

##### **b) Représentation des connaissances :**

La représentation graphique d'un réseau Bayésien est explicite, intuitive et compréhensible par un non spécialiste.

##### **c) Utilisation des connaissances :**

Un réseau est polyvalent, on peut se servir du même modèle pour évaluer, prévoir, diagnostiquer ou optimiser des décisions.

#### **d) Diversité de l'offre en matière de logiciels :**

Aujourd'hui il existe de nombreux logiciels sur le marché pour traiter les réseaux Bayésiens. Ces logiciels présentent différentes fonctionnalités :

- Apprentissage des probabilités.
- Apprentissage de la structure ;
- Possibilité d'intégrer des variables continues.

[14]

### **III.2. Définition du Réseau Bayésien (RB) :**

Un réseau bayésien est un outil complet permettant la visualisation de variables et de leurs dépendances (ou indépendances). Il permet également de décrire quantitativement le fonctionnement d'un système grâce aux différents calculs de probabilités concernant les variables du système. Généralement, on modélise les variables aléatoires comme étant des nœuds. On peut alors dresser un arc entre certaines variables du système. Les arcs tracés peuvent rendre compte d'un phénomène de causalité entre les variables reliées (réseaux causaux).

Le fait d'indiquer un arc entre deux variables implique une dépendance directe entre ces deux variables : l'une est le parent, et l'autre l'enfant. Il faut fournir le comportement de la variable enfant au vu du comportement de son ou ses (s'il y en a plusieurs) parents.

Pour cela, chaque nœud du réseau possède une table de probabilités conditionnelles. Une table de probabilités conditionnelles associée à un nœud permet de quantifier l'effet du ou des nœuds parents sur ce nœud : elle décrit les probabilités associées aux nœuds enfants suivant les différentes valeurs des nœuds parents. Pour les nœuds racines (sans parents), la table de probabilité n'est plus conditionnelle et fixe alors des probabilités a priori concernant les valeurs de la variable.

Les réseaux bayésiens interdisent les dépendances enfant vers parents. Ainsi, l'ensemble de variables et des arcs vont former un graphe dirigé (les arcs possèdent un sens), et acyclique (pas de cycle dans le graphe) [21].

De manière formelle, un réseau bayésien est défini par :

- un graphe acyclique orienté  $G$  (DAG : Direction acyclic graph),  $G = (V, E)$ , où  $V$  est l'ensemble des nœuds de  $G$ , et  $E$  est l'ensemble des arcs de  $G$ , ainsi  $G = (V, E)$ .  $V$  -- symbolise un ensemble de variables aléatoires  $X$ ,  $X = \{X_1, X_2\}$ .

- sa composante quantitative  $\mu$  représentée par des tables de probabilités (TP) pour les nœuds parents et des tables de probabilités conditionnelles (TPC) pour les nœuds descendants,  $\mu = \{\mu_i\} = \{P(X_i/\text{Parents}(X_i))\}$ . [14]

La figure 2 présente un exemple ordinaire d'un réseau bayésien à deux variables.

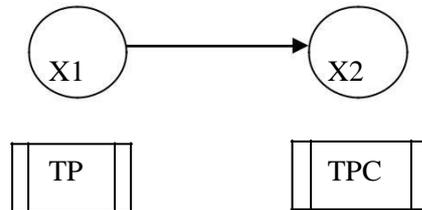


Figure.1: Exemple d'un réseau Bayésien à deux variables.

Les réseaux bayésiens sont donc une représentation à la fois qualitative et quantitative des relations entre les variables. Ces variables peuvent être discrètes (*TP*, *TPC*) ou continues, observables ou non observables et peuvent prendre différents états (vrai/faux, une échelle de probabilité) [23]

Le calcul dans un réseau bayésien s'appuie sur le théorème de Bayes. Soit deux variables aléatoires  $X1$  et  $X2$ , la probabilité conditionnelle de  $X2$  sachant  $X1$  est déterminée par la formule suivante : [14]

$$P(X2/X1) = \frac{P(X1/X2) P(X2)}{P(X1)}$$

- $P(X1)$  est la probabilité a priori (ou marginale) de  $X1$ .
- $P(X2/X1)$  est la probabilité a posteriori de  $X2$  sachant  $X1$ .
- $P(X1/X2)$  est la fonction de vraisemblance de  $X1$  connaissant  $X2$ .

Dans le cas général, où  $X = \{X1, X2, \dots, Xn\}$ , la fonction de distribution de probabilités jointe  $P(X)$  s'écrit comme suit :

$$P(X) = \prod_{i=1}^n P(X_i/\text{parents}(X_i))$$

### **III.3. Les avantages des Réseaux Bayésiens :**

Nous listons leurs principaux avantages ci-après :

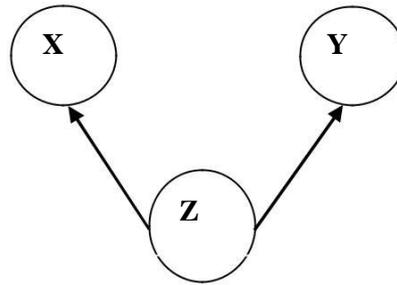
- les RB peuvent être utilisés pour apprendre des dépendances causales et pour modéliser des phénomènes aléatoires,
- un RB est une représentation graphique compacte et synthétique avec une facilité d'acquisition et d'utilisation de la connaissance,
- les RB peuvent combiner plusieurs aspects à la fois, des statistiques, des probabilités, de l'aide à la décision et le management des connaissances,
- pour l'utilisation, leur flexibilité permet d'interroger le même modèle graphique pour des objectifs différents, tels que la prédiction ou le diagnostic,
- de surcroît, ils permettent de modéliser la connaissance par une attribution des probabilités même si les données sont de nature incertaine,
- les algorithmes dédiés au calcul offrent un outil puissant pour la fusion des données incomplètes avec prise en compte des jugements des experts,
- pour les applications industrielles, la qualité de l'offre en matière d'outils rend les RB de plus en plus séduisants... [25]

### **III.4. Propriétés du Réseau Bayésien :**

Dans la théorie des graphes, les propriétés des modèles se présentent comme des outils théoriques permettant leur développement. Nous allons à présent étudier quelques propriétés des réseaux Bayésiens : [14]

#### **III.4.1. Indépendance conditionnelle :**

Soit X, Y et Z trois variables aléatoires, X est indépendante conditionnellement de Y sachant Z, si et seulement si  $P(X|Y,Z) = P(X|Z)$ . Cette propriété se traduit par le fait que sachant l'état Z, l'état de Y n'influence pas l'état de X (figure 3). Ce résultat est fondamental dans l'utilisation des réseaux Bayésiens, il est très utile dans la recherche des structures graphiques d'un réseau et permet de limiter les calculs de probabilités dans un graphe causal. Un graphe représentant des indépendances conditionnelles détient davantage de propriétés, comme celles de Markov [14].



$$X \perp Y \mid Z$$

Figure 3. Indépendance conditionnelle (connexion divergente).

### III.4.2. Boucle dans un réseau bayésien :

La structure d'un réseau bayésien ne doit pas contenir de circuits orientés (figure 4).

Cependant, l'un des résultats théoriques montrant la puissance de modélisation par *RB* indique qu'il existe toujours une représentation par *RB* des lois conjointes quelles que soient les dépendances stochastiques entre les variables aléatoires.

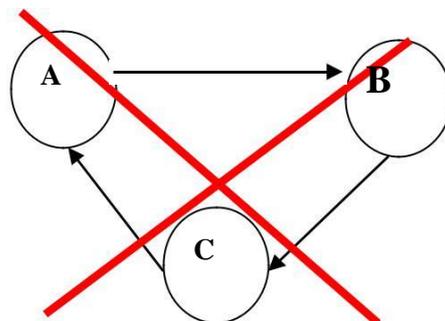


Figure. 4. Boucle dans un réseau bayésien. [14]

### III.5. Extension des réseaux bayésiens :

#### III.5.1. Réseau bayésien naïf :

Une première variante des RB est appelée réseaux bayésiens naïfs. Pour les problèmes de classification, cette variante est largement utilisée et elle a donné de très bons résultats, la terminologie classifieur Bayésien est souvent employée. Un RB naïf se compose d'un graphe à deux niveaux, un nœud parent discret pour le premier niveau (nommé nœud de classe  $C$ ) et des nœuds enfants (ou feuilles notés  $X_i$ ) pour le second. Les  $n$  modalités du nœud de classe  $C$  représentent le nombre de classe du problème ( $C_1, C_2, \dots, C_n$ ). Notons, pour cette structure simple, l'hypothèse très forte d'indépendance des feuilles (enfants) conditionnellement au parent. En tenant compte de cette hypothèse « naïve » d'indépendance entre les variables  $X_i$ , la probabilité jointe peut être exprimée par la formule :

$$P(C, x_1, x_2, \dots, x_n) = P(C) \prod_{i=1}^n P(X_i/C)$$

Où  $C$  est la variable de classe recherchée. [23]

La figure 5 présente un *RB* naïf avec ses deux niveaux. La tâche de classification consiste à reconnaître, après quantification de la structure graphique, la classe  $C$  d'une instanciation  $X_i$ .

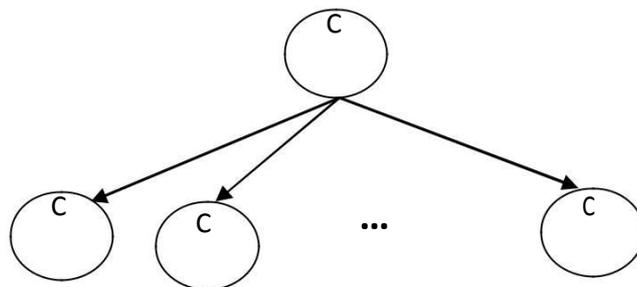


Figure .5. Réseau Bayésien naïf.

### III.5.2. Réseau bayésien dynamique (ou temporel) :

Dans un processus réel, l'une des variables les plus importantes est le temps. Pour un réseau bayésien statique (classique) chaque variable est décrite par un seul nœud et le réseau sous-jacent ne permet pas de prendre en compte des besoins d'application évoluant dans le temps. Les réseaux bayésiens dynamiques (RBD) sont définis en tant qu'une extension des RB, où une variable peut être décrite par plusieurs nœuds modélisant son comportement à plusieurs instants. La structure de la figure 6 présente un modèle par RBD, elle peut être considérée comme une duplication d'un RB à chaque pas de temps. Dans ce cas, la distribution de probabilité peut changer en fonction du temps comme dans les chaînes de Markov et elle est calculée pour une variable  $X_i$  à l'instant  $t$  connaissant ses états aux instants  $t-1$ ,  $t-2$ , etc. Une variable  $X_i$  dans un RB dynamique peut influencer donc sa valeur à l'instant d'après. [15]

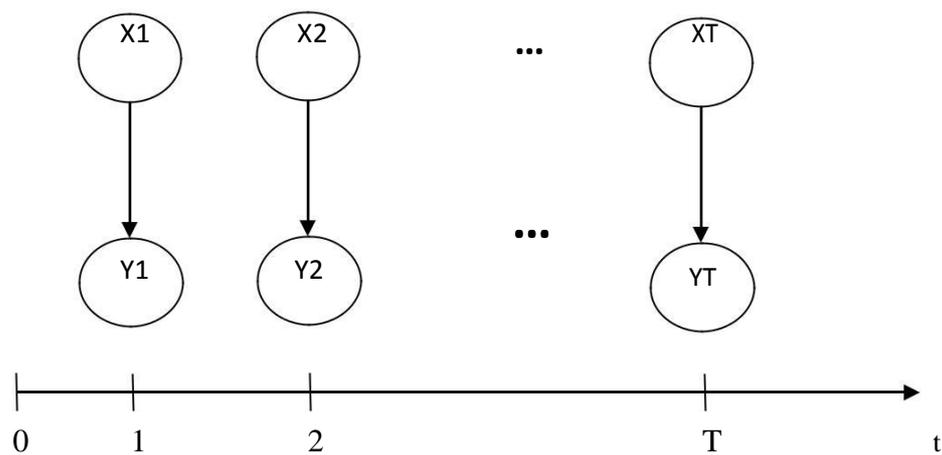


Figure 6. Réseau Bayésien Dynamique.

### **III.5.3. Réseau bayésien orienté objet :**

Pour certains types d'application, rendre le formalisme bayésien plus générique va simplifier considérablement la tâche de modélisation. En effet, pour un système complexe la modélisation par un réseau bayésien induit des modèles de taille importante et difficilement abordables. C'est la raison pour laquelle, des chercheurs ont proposé l'utilisation de réseaux bayésiens orientés objets OOBN (Object Oriented Bayesian Networks). Dans ces modèles, un objet regroupe une partie du réseau bayésien. L'objet peut être réutilisé plusieurs fois permettant ainsi de simplifier la représentation graphique et avoir un modèle avec différents niveaux d'abstraction. Il semble que les OOBN soient bien adaptés aux problèmes de modélisation des processus industriels dans le cadre de la maintenance et de la sûreté de fonctionnement. Cependant, l'inférence dans de telle structure reste délicate, une nouvelle génération de modèle probabiliste est proposée afin de gagner en efficacité [19].

### **III.5.4. Réseau bayésien étendu à un diagramme d'influence :**

Pour des problèmes liés au domaine de l'aide à la décision, une extension des réseaux bayésiens (statique et dynamique) est envisageable. Il s'agit du concept des Diagrammes d'Influence (DI) qui sont une généralisation de la méthode des arbres de décision. Pour cette structure, la nouveauté dans la démarche de modélisation réside dans l'ajout de deux nouveaux types de nœuds à la structure initiale du réseau Bayésien comme le montre la figure 7. Au final, un diagramme d'influence comporte trois types de nœuds, les nœuds de probabilité du RB initial, les nœuds de décision permettent de représenter une action sur le système et enfin les nœuds d'utilité pour modéliser le coût associé à une variable du modèle ou une action sur le système. [16]

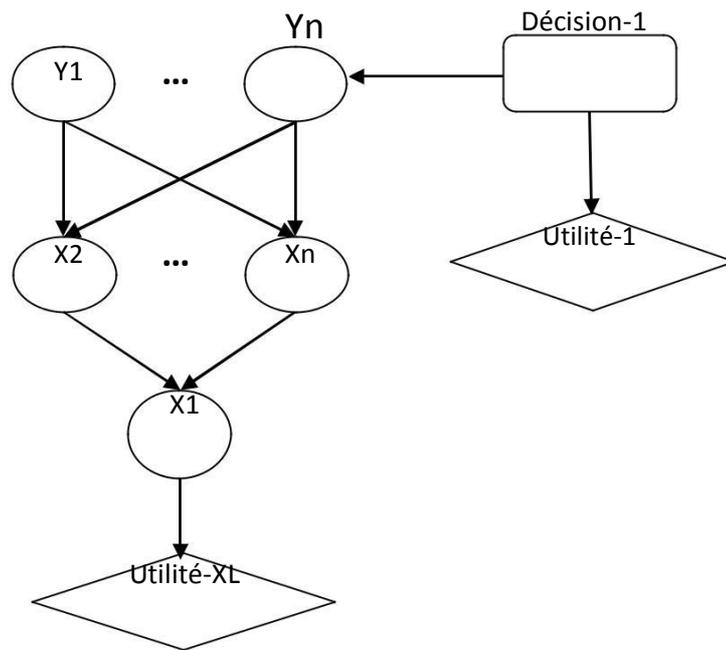


Figure .7. Diagramme d'influence.

### III.6. Méthodes algorithmiques :

Pour construire et utiliser un réseau bayésien, nous devons introduire les deux concepts d'apprentissage et d'inférence, ce sont les deux principaux problèmes dans le raisonnement probabiliste bayésien : [23]

#### III.6.1. L'apprentissage :

L'apprentissage dans un réseau bayésien est une approche inductive. Nous distinguons deux types d'apprentissage : paramétrique et structurel. Le premier permet d'estimer les lois de probabilités conditionnelles (paramètres) étant donnée une structure de *RB*, quant au second, il vise à déterminer une structure graphique optimale du modèle à partir d'un ensemble de données observées. Il convient de noter que le nombre de structures graphiques apprises croît de manière super-exponentielle en fonction du nombre de variables du réseau (par exemple, pour dix nœuds le nombre de graphes possibles est environ  $4 \times 10^{18}$ ).

Notons aussi que les deux apprentissages peuvent être complémentaires pour un problème donné et qu'une structure peut être définie à partir des avis des experts, de même

pour l'estimation des distributions de probabilités. L'apprentissage trouve son intérêt lorsque les jugements de l'expert présentent leurs limites ou quand la taille de données et le nombre de nœuds sont importants, [23]

### III.6.2. L'inférence :

L'inférence dans un réseau bayésien est une approche déductive, l'objectif de l'inférence est de calculer (ou de mettre à jour) n'importe quelle probabilité conditionnelle d'une variable du modèle à partir de la structure causale (arbre causes à effets) et les distributions de probabilités associées. Le théorème de Bayes et les lois de probabilités conditionnelles sont au cœur de ce calcul. Selon la complexité du réseau, nous distinguons deux types d'inférences : exacte et approchée. [23]

La figure 8 résume les principales familles d'apprentissage et d'inférence dans les réseaux bayésiens.

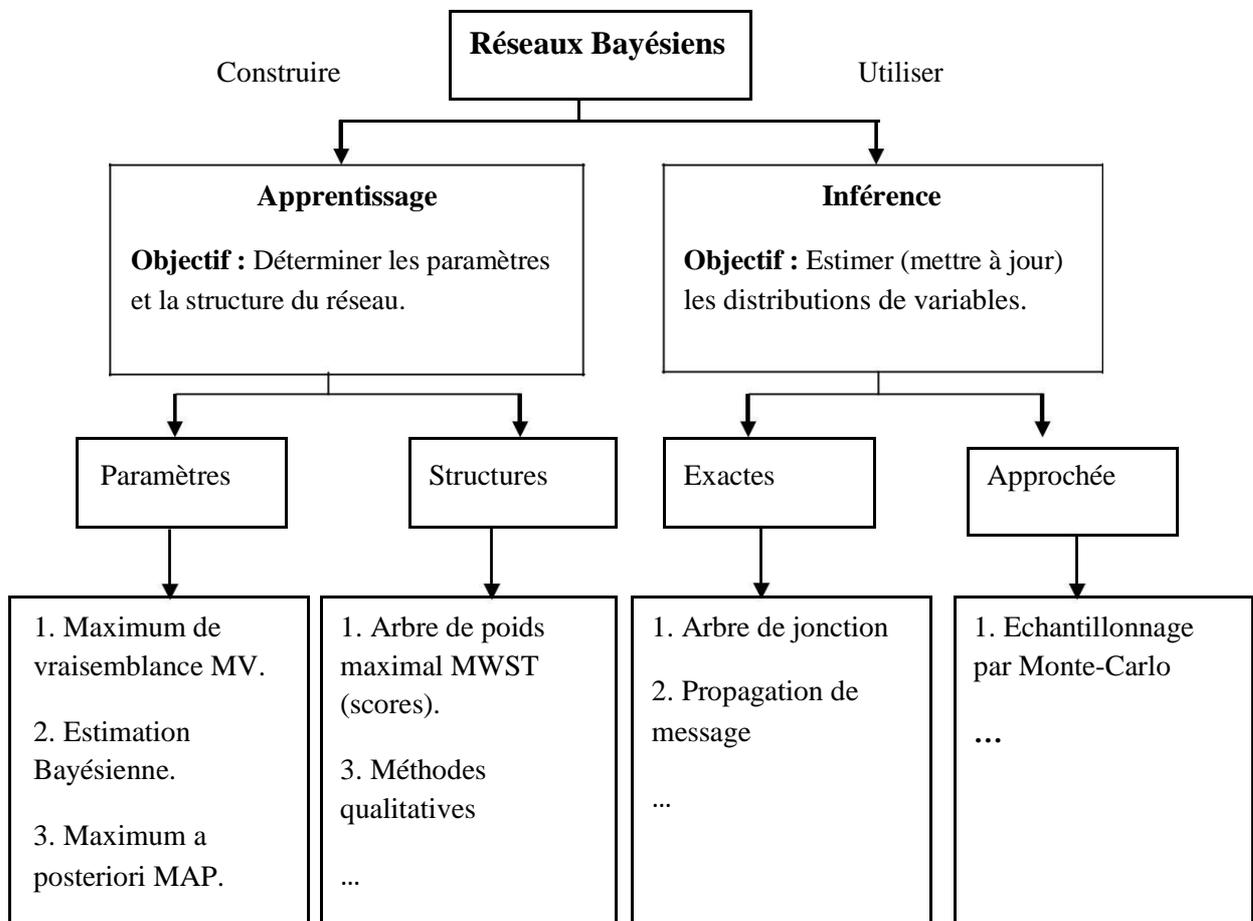


Figure 8. Apprentissage et inférence dans les réseaux Bayésiens.

### **III.7. Difficultés dans l'utilisation des réseaux bayésiens :**

L'utilisation essentielle des réseaux bayésiens est de calculer des probabilités conditionnelles d'événements reliés les uns aux autres par des relations de cause à effet. Cette utilisation s'appelle l'inférence.

La correspondance qui existe entre la structure graphique et la structure probabiliste associée va permettre de ramener l'ensemble des problèmes de l'inférence à des problèmes de théorie des graphes.

Cependant, ces problèmes restent relativement complexes, et donnent lieu à de nombreuses recherches.

Une difficulté essentielle des réseaux Bayésiens se situe précisément dans l'opération de transposition du graphe causal à une représentation probabiliste. Même si les seules tables de probabilités nécessaires pour définir entièrement la distribution de probabilité sont celles d'un nœud conditionné par rapport à ses parents. Il reste que la définition de ces tables n'est pas toujours facile pour un expert [17].

### **III.8. Quand utilise-t-on les réseaux bayésiens ?**

Dans quels cas utilise-t-on les réseaux bayésiens (RB) ? Les RB sont des modèles probabilistes qui permettent de décrire des phénomènes complexes qui ne peuvent pas être modélisés analytiquement. L'utilisation des RB est recommandée lorsqu'il s'agit de résoudre un problème où il y a des dépendances entre variables incertaines, et particulièrement quand ces dépendances sont-elles mêmes incertaines.

Les réseaux bayésiens permettent :

- de modéliser et de capitaliser des connaissances (connaissances d'experts, exploitation de bases de données de retour d'expérience, de marketing, de détection de fraudes,...),
- d'étudier la dépendance entre variables (applications en sûreté de fonctionnement),
- d'établir des diagnostics (applications en médecine, et en maintenance),
- de mener des études prospectives (analyse globale du risque),
- de modéliser et de simuler des systèmes complexes (réseaux bayésiens dynamiques),
- d'aider à la prise de décision (gestion des risques). [25]

L'utilisation des réseaux bayésiens est généralement privilégiée sur les critères de facilité d'acquisition, de représentation, et d'utilisation de la connaissance. En ce qui concerne la programmation des algorithmes, il existe de nombreuses bibliothèques traitant les réseaux bayésiens (*BNT Matlab, BNJava, JavaBayes, PNL...*) et la qualité d'offre en matière de logiciels (*BayesiaLab, Netica, Hugin, Elvira...*) favorise encore davantage leur utilisation. [23]

### III.9. Construction d'un réseau bayésien :

Le réseau bayésien peut être construit :

- par expertise,
- par analyse fonctionnelle,
- par apprentissage, en exploitant une base de données (ce procédé est encore au stade de recherche et développement).

La construction d'un réseau bayésien s'effectue en trois étapes essentielles, qui sont présentées sur la figure 9.

Chacune des trois étapes peut impliquer un recueil d'expertise, au moyen de questionnaires écrits, d'entretiens individuels ou encore de séances de *brainstorming*. [14]

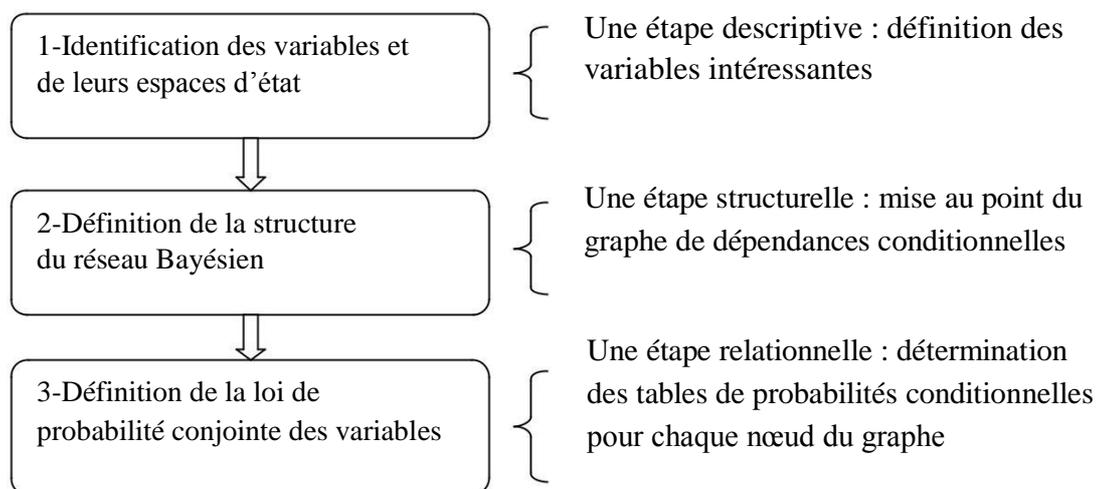


Figure 9. Étapes de construction d'un réseau bayésien.

### **III.9.1 Identification des variables et de leurs espaces d'états :**

La première étape de construction du réseau bayésien est la seule pour laquelle l'intervention humaine est absolument indispensable. Il s'agit de déterminer l'ensemble des variables  $X_i$ , catégorielles ou numériques, qui caractérisent le système. Comme dans tout travail de modélisation, un compromis entre la précision de la représentation et la maniabilité du modèle doit être trouvé, au moyen d'une discussion entre les experts et le modélisateur.

Lorsque les variables sont identifiées, il est ensuite nécessaire de préciser l'*espace d'états* de chaque variable  $X_i$ , c'est-à-dire l'ensemble de ses valeurs possibles [14].

Lors de cette étape, il s'agit de définir :

- les variables aléatoires pertinentes pour le problème à résoudre,
- les états associés à chaque variable aléatoire (les modalités) [25].

La majorité des logiciels de réseaux bayésiens ne traite que des modèles à variables discrètes, ayant un nombre fini de valeurs possibles. Si tel est le cas, il est impératif de discrétiser les plages de variation des variables continues. Cette limitation est parfois gênante en pratique, car des discrétisations trop fines peuvent conduire à des tables de probabilités de grande taille, de nature à saturer la mémoire de l'ordinateur [14].

### **III.9.2 Définition de la structure du réseau bayésien :**

Une fois les variables aléatoires identifiées, il faut définir les dépendances (les influences) qui les relient.

Chaque variable :

- influence d'autres variables,
- est influencée par d'autres variables.

On peut aussi définir la force de ces influences : faible, moyenne, forte. [25]

En d'autre terme la deuxième étape consiste à identifier les liens entre variables, c'est-à-dire à répondre à la question : pour quels couples  $(i, j)$  la variable  $X_i$  influence-t-elle la variable  $X_j$ ?

Dans la plupart des applications, cette étape s'effectue par l'interrogation d'experts. Dans ce cas, des itérations sont souvent nécessaires pour aboutir à une description

consensuelle des interactions entre les variables  $X_i$ . L'expérience montre cependant que la représentation graphique du réseau bayésien est dans cette étape un support de dialogue extrêmement précieux [14].

### **III.9.3. Loi de probabilité conjointe des variables :**

La dernière étape de construction du réseau bayésien consiste à renseigner les tables de probabilités associées aux différentes variables [14].

Ceci permet de décrire de manière plus précise la relation de cause à effet entre les variables liées [25].

Dans un premier temps, la connaissance des experts concernant les lois de probabilité des variables est intégrée au modèle. Concrètement, deux cas se présentent selon la position d'une variable  $X_i$  dans le réseau bayésien :

- La variable  $X_i$  n'a pas de variable parente : les experts doivent préciser la loi de probabilité marginale de  $X_i$ .
- La variable  $X_i$  possède des variables parentes : les experts doivent exprimer la dépendance de  $X_i$  en fonction des variables parentes, soit au moyen de probabilités conditionnelles, soit par une équation déterministe (que le logiciel convertira ensuite en probabilités).

Le recueil de lois de probabilités auprès d'experts est une étape délicate du processus de construction du réseau bayésien. Typiquement, les experts se montrent réticents à chiffrer la plausibilité d'un événement qu'ils n'ont jamais observé.

Cependant, une discussion approfondie avec les experts, aboutissant parfois à une reformulation plus précise des variables, permet dans de nombreux cas l'obtention d'appréciations qualitatives. Ainsi, lorsqu'un événement est clairement défini, les experts sont généralement mieux à même d'exprimer si celui-ci est probable, peu probable, hautement improbable, etc.

Le cas d'absence totale d'information concernant la loi de probabilité d'une variable  $X_i$  peut être rencontré. La solution pragmatique consiste alors à affecter à  $X_i$  une loi de probabilité arbitraire, par exemple une loi uniforme [14].

Cette étape relationnelle peut également être réalisée par apprentissage sur la base d'un échantillon d'individus observés (données de retour d'expérience), l'apprentissage peut

calculer les différentes probabilités conditionnelles. Ainsi, l'apprentissage permet de chercher le meilleur jeu de paramètres pour rendre compte des données observées. Cet apprentissage peut être réalisé, par exemple, par le logiciel Netica qui utilise la méthode de propagation de probabilités par arbres de jonction. BayesiaLab a réalisé également des travaux importants sur l'apprentissage [25].

La quasi-totalité des logiciels commerciaux de réseaux bayésiens permet l'apprentissage automatique des tables de probabilités à partir de données. Par conséquent, dans un second temps, les éventuelles observations des  $X_i$  peuvent être incorporées au modèle, afin d'affiner les probabilités introduites par les experts [14].

Une fois la construction du réseau terminée, on peut :

- donnée les probabilités a priori,
- déterminer les probabilités a posteriori des différentes variables aléatoires,
- identifier les facteurs les plus influents et particulièrement ceux sur lesquels on peut agir,
- imaginer des actions sur ces facteurs importants sur lesquels on peut agir,
- et quantifier l'impact de ces actions sur les variables de sortie. [25]

### **III.10. Un exemple simple de réseau bayésien :**

Pour illustrer les réseaux bayésiens, on va reprendre un exemple (figure.10), extrêmement classique dans la littérature sur les réseaux bayésiens. Nous allons d'abord faire les calculs analytiques.

Problématique :

Ce matin-là, alors que le temps est clair et sec, M. Holmes sort de sa maison. Il s'aperçoit que la pelouse de son jardin est humide. Il se demande alors (1) s'il a plu pendant la nuit, ou s'il a simplement oublié de débrancher son arroseur automatique. Il jette alors un coup d'œil à la pelouse de son voisin, M. Watson, et s'aperçoit qu'elle est humide. Il en déduit alors qu'il a probablement plu (2), et il décide de partir au travail sans vérifier son arroseur.

Nous avons alors quatre variables (qui sont les événements) qui peuvent prendre chacune la valeur « vrai » ou « faux » :

A : M. Holmes a oublié de débrancher son arroseur.

P : Il a plu durant la nuit.

J : L'herbe de son jardin est humide.

W : L'herbe du jardin de M. Watson est humide.

Construction d'un réseau Bayésien :

Résonnement intuitive

Si M. Holmes a oublié de débrancher son arroseur, son jardin est forcément humide : d'où la liaison A-J.

Cela est aussi vrai s'il a plu : liaison P-J.

S'il a plu, même le jardin du voisin Mr. Watson est forcément mouillé : liaison P-W

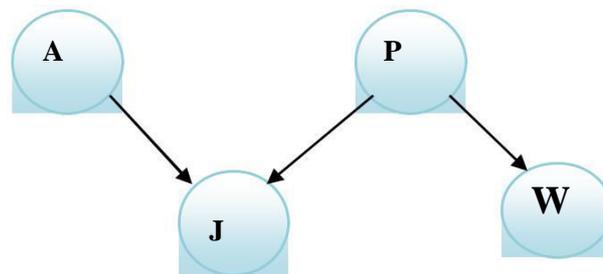


Figure.10 : Réseau Bayésien Mr. Holmes

A partir de nos connaissances subjectives, nous pouvons évaluer les probabilités de certain événement. Nous pouvons également traduire le fait qu'il n'y a aucun lien a priori entre le fait qu'il ait plu cette nuit, et le fait que M. Holmes ait oublié de débrancher son arroseur automatique. Ainsi le tableau 6 nous donne des probabilités à priori.

Événement	Probabilité	Commentaire
A = vrai	0.40	Mr Holmes oublie assez souvent de débrancher son arroseur.
A = faux	0.60	
P = vrai	0.40	La région est relativement pluvieuse dans cette période.
P = faux	0.60	

Tableau 6. Tableau des probabilités à priori

Tableau des probabilités conditionnelles pour J (tableau 7) :

	A = vrai		A = faux	
	P = vrai	P = faux	P = vrai	P = faux
J = vrai	1	1	1	0
J = faux	0	0	0	1

Tableau 7. Tableau des probabilités conditionnelles pour J

Tableau des probabilités conditionnelles pour W (tableau 8) :

	P = vrai	P = faux
W = vrai	1	0
W = faux	0	1

Tableau.8. Tableau des probabilités conditionnelles pour W

Calcul probabiliste analytique :

M. Holmes sort de sa maison. Il s'aperçoit que la pelouse de son jardin est humide, il se pose alors une première question :

1/ Il se demande alors s'il a plu pendant la nuit, ou s'il a simplement oublié de débrancher son arroseur automatique. Pour répondre à cette question cela revient à calculer et comparer :

$P(A = \text{vrai} / J = \text{vrai})$  et  $P(P = \text{vrai} / J = \text{vrai})$ .

Pour cela on utilise le théorème de Bayes :

$$p(A/B) = \frac{p(A \cap B)}{p(B)} = \frac{p(B/A) \cdot p(A)}{p(B)}$$

Soit :

$$p(A = \text{vrai} / J = \text{vrai}) = \frac{p(J = \text{vrai} / A = \text{vrai})p(A = \text{vrai})}{p(J = \text{vrai})}$$

De même :

$$p(A = V / J = V) = \frac{p(J = V / A = V)p(A = V)}{p(J = V)}$$

Et

$$p(P = A / J = V) = \frac{p(J = V / P = V)p(P = V)}{p(J = V)}$$

On peut aussi calculer les prévisionnelles conditionnelles, par la propriété d'inversion de Bayes :

$$p(J=V) = p(J=V/A=V, P=V).p(A=V).p(P=V) + p(J=V/A=V, P=F).p(A=V).p(P=F) + p(J=V/A=F, P=V).p(A=F).p(P=V) + p(J=V/A=F, P=F).p(A=F).p(P=F)$$

Application numérique:

$$p(J=V) = 1 * 0.40 * 0.40 + 1 * 0.40 * 0.60 + 1 * 0.60 * 0.40 + 0 * 0.60 * 0.60 \\ = 0.16 + 0.24 + 0.24 = 0.64$$

D'où

$$p(P = V / J = V) = \frac{1 * 0.40}{0.64} = 0.625$$

De la même manière on retrouve  $p(A=V/J=V) = 0.625$

Nous retrouvons ici numériquement le résultat intuitif vu plus haut, à savoir que :

- La croyance en chacune des deux causes (P) et (J) est renforcée de 0.40 à 0.625.
- Il n'est pas possible de privilégier l'une des deux causes avec cette seule information.

Dans la seconde partie (2) de son raisonnement, M. Holmes est alors amené à comparer  $p(A=V/J=V, W=V)$  avec  $p(P=V/J=V, W=V)$

On retrouve facilement que :

$$P(P=V/J=V, W=V) = 1$$

Mr Holmes est alors certain (100%), que si la peleuse de son voisin est mouillée (W), il a plu cette nuit et va au travail sans vérifier son arroseur (A).

De même :

$$P(A=V/J=V, W=V) = p(A=V) = 0.40 \text{ ( indépendance entre W et A)}$$

### **Interprétation :**

Mr Holmes a la certitude qu'il a plu (100%), il n'a donc aucune raison de modifier sa croyance à priori, puisque la probabilité que l'arroseur est resté branché est plus faible (40%).

Pour la construction du modèle bayésien dans notre cas pratique nous avons utilisé la méthode HEMP que nous présentons dans ce qui suit.

## **IV. La méthode HEMP :**

La méthode HEMP est l'acronyme de Hazards and Effects Management Process, aussi également connu sous le nom de PGRE (le procédé de gestion des risques et effets). [26]

### **IV.1. définition:**

Le procédé de gestion des risques et effets ; est une approche systématique d'identification et de traitement des risques.

En général, la méthode exige.

L'identification des risques associés.

L'évaluation de l'implantation relative du risque pour contrôler, ces risques et leurs rétablissements en cas d'échec de contrôle.

La spécification des contrôles est exigée pour gérer les risques en dessous des niveaux de tolérances.

Le développement des mesures de rétablissement nécessaires pour atténuer les risques et réduire au minimum les conséquences des contrôles échoués ou s'avérant insatisfaisants. [26]

## IV.2. Les étapes de la méthode HEMP :

Les étapes de la méthode HEMP sont les suivant (figure 11):

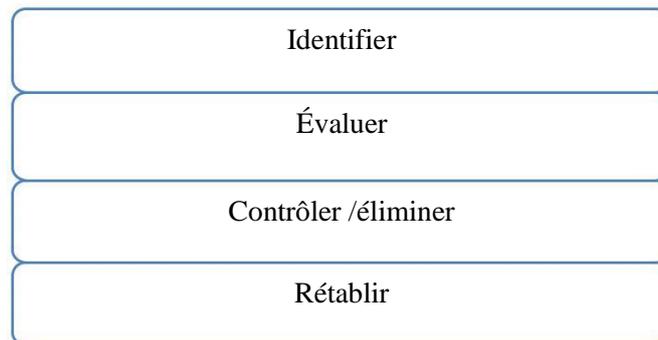


Figure 11 : les étapes de la méthode HEMP.

### 1) **Identifier** : quels sont les risques?

L'identification des risques se réalise essentiellement par les mécanismes suivant :

- Les vérifications opérationnelles quotidiennes ou vérification avant –travail/ après travail ;
- Audits de contrôle ; conséquence d'accidents ou incidents.
- Quelque soit le mécanisme de leur découverte, les dangers doit être signalés et, si possible, la situation doit être sécurisée avant de reprendre les opérations.
- Tous les rapports des dangers devront être introduits dans le registre des dangers.

## 2) Evaluer :

Les dangers sont évalués en fonction de leurs aspects sanitaires, environnementaux, et leur réputation tout en considérant leurs conséquences potentielles et la probabilité de leur survenue (matrice d'évaluation de risque). Les dangers et les mesures de leur contrôle doivent être réévalués périodiquement et chaque fois qu'un changement significatif le justifie.

Les outils aidant à évaluer les risques comportent :

La matrice d'évaluation de risques (RAM) ;

Etude de danger et d'opérabilité (HAZOP) ;

Evaluation de risque de qualité (QRA)

; Evaluation de risque sanitaire(HRA) ;

Evaluation d'impacte sur l'environnement(EIA).

## 3) Contrôler / éliminer : comment vous contrôlez ces risques?

Le but principal de HEMP est d'éliminer ou contrôler les risques. Une fois le risque est identifié, les menaces générées par ces risques doivent également être identifiées. De cette façon, des barrières et des contrôles appropriés peuvent être mise en place contre le déclenchement d'un danger.

## 4) Rétablir/limiter : qu'advient il si le risque persiste?

En cas des échecs des contrôles des mesures d'atténuation et de rétablissement devront être prises. Ces mesure d'atténuation et de rétablissement sont planifiées et documentées avant le déclenchement d'un danger. Cette étape peut comporter:

Les plans de réponse d'urgence ou bien d'intervention.

Plan de réponse en cas de déversement accidentel.

Accord d'aide mutuelle.

Plan de continuité de travail.

## IV.3. Exécution de la méthode HEMP:

Pour faciliter la mise en œuvre de la méthode HEMP nous avons suivi les étapes comme suit :

### IV.3.1. Détermination des activités, les tâches et les Capacité liés aux processus de l'entreprise : (tableau 9)

Activité	Tâches	Capacité
Activité 1	Tâche 1 Tâche 2 ...	
Activité 2 . . .		
Activité n		

Tableau 9. Les activités, les tâches et les Capacité liés aux processus de l’entreprise.

**Famille des risques :**

La classification des risques par famille est présentée selon le tableau 10.

Famille des risques	Risques spécifique
Activité 1	
Activité 2	
Activité 3	
Activité 4	
Activité	
Activité n	

Tableau 10 : famille des risques

#### IV.3.2. Evaluation des risques : (Tableau 11)

Risque	Causes et sources	Conséquences

Tableau 11 : Evaluation des risques

#### V. Inférence Bayésienne :

Pour calculer l'inférence dans notre cas, nous avons utilisé le logiciel BayesiaLab basé sur l'algorithme de jonction.

Pourquoi utiliser le BayesiaLab :

- le BayesiaLab, permet de prendre dès aujourd'hui les bonnes décisions de demain ;
- il est facile à exploiter ;
- évolutif.

BayesiaLab est un logiciel d'édition et d'apprentissage automatique de réseaux bayésiens permettant de représenter la connaissance des experts et de découvrir celle enfouie sous une masse de données.

Le point important dans l'algorithme de jonction (JLO) est la phase de propagation qui basé sur la propagation de messages (*message passing*), l'idée consiste à passer une nouvelle information (message) d'un ensemble de variable (une clique) à ses voisines dans l'arbre de jonction, et de mettre à jour les voisines et les séparateurs avec cette information locale. [14]

Nous présentons sur le tableau 12 les différentes étapes de l'algorithme de l'arbre de jonction.

N	Etapas
1	Transformation du graphe : construire un arbre de jonction à partir du graphe original acyclique et diriger ;
2	Moralisation de l'arbre : Relier les parents entre eux s'ils ont des enfants communs ;
3	Triangulation de l'arbre : Ajouter des arcs pour obtenir un graphe triangulé à partir d'un graphe non dirigé ;
4	Obtention de l'arbre de jonction : Identifier les cliques, puis les connecter pour construire un arbre ;
5	Propagation et mise à jour de la distribution ;
6	Fin.

Tableau. 12. Algorithme de l'arbre de jonction (JT) pour l'inférence exacte.

L'algorithme se comporte de la façon suivante :



**la phase de construction** : elle nécessite un ensemble de sous-étapes permettant de transformer le graphe initial en un arbre de jonction, dont les nœuds sont des clusters (regroupement) de nœuds du graphe initial. Cette transformation est nécessaire, d'une part pour éliminer les boucles du graphe, et d'autre part, pour obtenir un graphe plus efficace quant au temps de calcul nécessaire à l'inférence, mais qui reste équivalent au niveau de la distribution de probabilité représentée. Cette transformation se fait en trois étapes :

- 1- Moralisation du graphe
- 2- Triangulation du graphe
- 3- Création d'un arbre couvrant minimal (arbre de jonction)

**4- Création d'un arbre couvrant minimal (arbre de jonction) :**

La construction de l'arbre de jonction est la dernière partie avant de procéder à l'inférence proprement dite. Nous rappelons que pour un réseau bayésien donné, l'arbre de

jonction est construit une et une seule fois. Cette méthode a une complexité, en temps et en mémoire, exponentielle et en la largeur d'arbre.

Les calculs probabilistes auront lieu dans l'arbre de jonction autant de fois que nécessaire. Cependant, pour un réseau bayésien donné, il existe plusieurs arbres de jonction possibles : ils sont fonction de l'algorithme de triangulation et de l'algorithme de construction utilisé.

Il apparaît clairement que pour toute clique  $C_i$ , il existe une clique  $C_j$  telle que  $C_i \cap C_j \neq \emptyset$ ,  $C_i \cap C_j = S$ . Cette propriété est intéressante et permettra la construction de l'arbre de jonction.

Où  $C$  est l'ensemble des cliques du graphe et  $S$  l'ensemble des séparateurs de l'arbre de jonction.

➤ **La phase de propagation** : il s'agit de la phase de calcul probabiliste à proprement parler où les nouvelles informations concernant une ou plusieurs variables sont propagées à l'ensemble du réseau, de manière à mettre à jour l'ensemble des distributions de probabilités du réseau. Ceci se fait en passant des messages contenant une information de mise à jour entre les nœuds de l'arbre de jonction précédemment construit. A la fin de cette phase, l'arbre de jonction contiendra la distribution de probabilité sachant les nouvelles informations, c'est-à-dire  $P(V | \varepsilon)$  où  $V$  représente l'ensemble des variables du réseau bayésien et  $\varepsilon$  l'ensemble des nouvelles informations sur les dites variables.  $\varepsilon$  peut, par exemple, être vu comme un ensemble d'observations faites à partir de capteurs.

La propagation suit le principe suivant :

• **Initialisation** :

$\forall C_i \in C$ , énumérées dans l'ordre de la propriété courante,

$$\Psi_{C_i}^0 = \prod_{\substack{X \in C_i, X \notin C_j, \\ j < i}} P(X/Pa(X)) \quad (4)$$

$\forall S \in S$ ,  $\Psi^0_S = 1$  (fonction constante).

$\Psi(S)$ : potentiels des séparateurs.

$\Psi(C)$ : potentiels des cliques.

• **Collecte** : soit une clique  $C_i$  dont toutes les cliques adjacentes  $C_k$  sauf une unique  $C_j$  ont calculé leurs  $\Psi_{C_k}^1$ . Alors on met à jour successivement les potentiels du séparateur  $S_{ij}$  puis de la clique  $C_j$  de la façon suivante :

$$\Psi_{S_{ij}1}(s) = \sum \Psi_{C_i1} C_i \setminus S_{ij}(c) \quad (5)$$

$$\Psi_{C_j}^1 = \Psi_{C_j}^0 \frac{\Psi_{S_{ij}1}}{\Psi_{S_{ij}0}} \quad (6)$$

On itère cette étape tant qu'il existe une telle clique (noter que les nœuds pendants de l'arbre de jonction initient cette propagation).

• **Distribution** : le dernier nœud de l'étape précédente, racine de la propagation, distribue vers tous ses voisins (qui feront de même) en utilisant exactement les mêmes formules que ci-après.

$$\Psi_{S_{ij}2}(s) = \sum \Psi_{C_i2} C_i \setminus S_{ij}(c) \quad (7)$$

$$\Psi_{C_j}^2 = \Psi_{C_j}^1 \frac{\Psi_{S_{ij}2}}{\Psi_{S_{ij}1}} \quad (8)$$

$\lambda = \frac{\Psi_{S_{ij}2}}{\Psi_{S_{ij}1}}$  : le facteur de mis à jour

Il est à noter que la cohérence (calcul de la probabilité marginale d'un nœud  $X$  identique dans chaque clique contenant  $X$ ) n'est atteinte qu'à la fin de la propagation ou plus précisément, lorsque  $\Psi^2$  a été calculé dans chaque clique contenant la variable  $X$ . [14]

## **VI. Conclusion :**

La modélisation à l'aide de RB présente de nombreux avantages. Pour l'utilisation, leur flexibilité permet d'interroger le même modèle graphique pour des objectifs différents tels que la prédiction ou le diagnostic.

Avec l'exemple précédent, on remarque combien il devient difficile de manipuler les réseaux bayésiens pour les grands réseaux, par ailleurs la quasi-totalité des logiciels commerciaux de réseaux bayésiens permet l'apprentissage automatique des tables de probabilités à partir de données.

Dans ce chapitre, nous avons présenté d'une part le réseau bayésien. Et d'autre part la méthode choisie, à savoir HEMP, permettant de construire le modèle bayésien.

***Chapitre III***  
***Réalisation de modèle bayésien***

## **Introduction :**

Cette recherche a mis au point un modèle d'évaluation des risques par réseau bayésien afin d'évaluer les risques sur le chantier de construction. En tant que tel, les relations de causalité entre les événements liés au risque et les facteurs de risque établissent la méthode du réseau bayésien comme suit:

- établir la structure du risque de la construction.
- développer les tableaux de probabilité conditionnelle (CPT) des nœuds du risque.
- évaluer les probabilités moyennes des facteurs des risques et les probabilités des événements en fonction du risque.
- mis à jour les probabilités des nœuds (facteurs de risque, paramètres de risque et événements de risque) par la base de données sur les accidents réels.
- évaluer les facteurs influant sur les risques en fonction des données réelles.
- évaluer les niveaux des événements des risques en fonction des résultats des probabilités et des influences des événements de risque.

. Les données subjectives de cette recherche ont été obtenues à partir des questionnaires pour les experts ou les travailleurs ayant une expérience de gestion de la sécurité sur le chantier. La base de données sur les accidents a été obtenue auprès de la Caisse Nationale d'Assurance Maladie des Travailleurs Salariés (France).

## **Établissement du modèle causal des risques avec les réseaux bayésiens**

Les réseaux bayésiens se composent de trois couches, y compris les événements de risque, les paramètres de risque et les facteurs de risque, comme le montre la figure 12. Par exemple, l'événement de risque «incendie» peut être directement causé par divers paramètres tels que le stockage inapproprié de matériaux inflammables et explosifs, le soudage près des matériaux inflammables, etc. Les facteurs de risque sont les principales origines causales d'un cadre spécifique. Par exemple, le manque de formation est l'un des principaux facteurs qui amènent les travailleurs à se souder à côté de matériaux inflammables.

Dans ce modèle, chaque paramètre ou facteur est traité comme un nœud comportant deux états: survenu ou non. Ici Y indique que l'événement se produit et N indique que l'événement ne se produit pas.

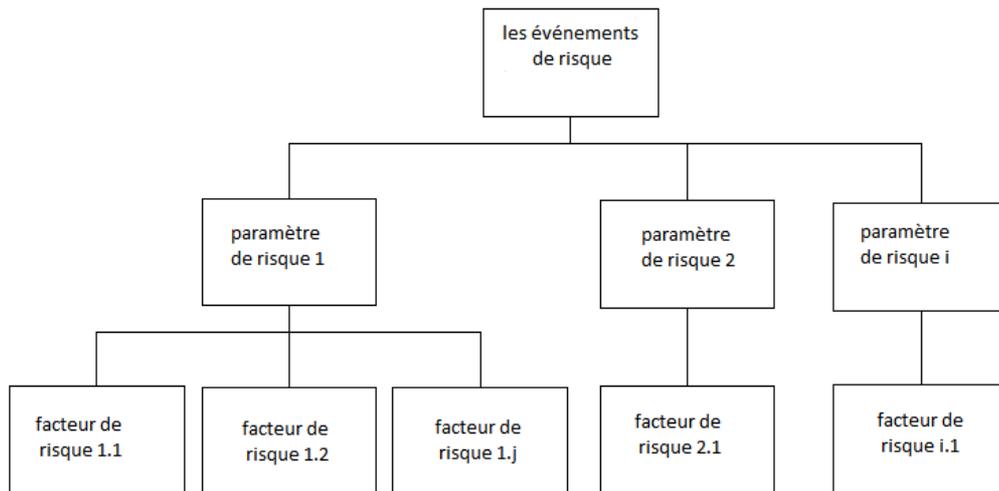


Figure 12 Structure du risque par Réseau bayésien

### Identification des tables de probabilité conditionnelle (CPT) des nœuds parents

Après avoir développé la structure du réseau bayésien, la table de probabilité conditionnelle (CPT) de chaque nœud parent (paramètre de risque ou événement) est nécessaire pour d'autres analyses.

Les nœuds parents du réseau bayésien sont classés en deux groupes: le type M et le type N. Leur différence est représentée par les CPT de leurs nœuds enfants. Les nœuds de type M se produisent uniquement dans les probabilités de 0% ou 100% lorsque leurs nœuds parents se produisent ou ne se produisent pas qui ont été obtenus par déduction logique. D'autre part, les nœuds de type N se produisent dans les probabilités d'une valeur comprise entre 0% et 100% lorsque leurs nœuds parents se produisent ou ne se produisent pas, ce qui a été obtenu par l'apprentissage par machine avec un ensemble de données ou par les expériences des experts. Les utilisateurs doivent reconnaître les nœuds comme type M ou N afin de recueillir les informations correspondantes pour le réseau bayésien.

Un exemple de déduction logique dans un réseau bayésien est présenté à la figure 13. C est le nœud parent où A et B sont des nœuds enfants. En utilisant le nœud de type M pour illustrer leurs relations, AND et OR peuvent être appliqués au nœud parent tel qu'illustré à la Figure 14 et à la Figure 15. Les deux relations logiques possèdent une porte logique dans l'arbre des défauts tandis que leurs CPT diffèrent. La figure 16 montre le CPT du nœud parent C en termes de AND logique. La logique délimite que seulement si A et B se produisent, C se produit. La figure 17 démontre le CPT du nœud parent C en termes de OR logique. Cette logique se détériore chaque fois que A ou B se produit, C se produit.

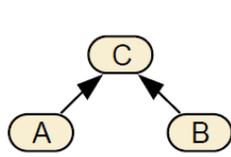


Fig.13 Bayesian Network



Fig.14 logical AND



Fig.15 logical OR

Node: C

Chance % Probability

A	B	Y	N
Y	Y	100.00	0.000
Y	N	0.000	100.00
N	Y	0.000	100.00
N	N	0.000	100.00

Fig.16 CPT of logical AND

Node: C

Deterministic

A	B	C
Y	Y	Y
Y	N	Y
N	Y	Y
N	N	N

Fig.17 CPT of logical OR

Node: C

Chance % Probability

A	B	Y	N
Y	Y	100.00	0.000
Y	N	100.00	0.000
N	Y	100.00	0.000
N	N	1.000	99.000

Fig.18 CPT of modified logical OR

À des fins de recherche, le CPT du nœud parent en OR logique peut être corrigé. Si la figure 13 ne comporte pas tous les facteurs de risque dans le réseau bayésien, l'événement de risque d'être moins susceptible de se produire, ce qui entraîne une probabilité extrêmement faible. En utilisant la logique OU pour délimiter cette relation, les nœuds enfants sont tous deux affectés avec une valeur de probabilité extrêmement faible (par exemple, 1%) pour indiquer une faible probabilité de l'existence de leurs nœuds parents (Figure18). Avec une opinion d'expert différente, les valeurs de probabilité corrigées des nœuds enfants peuvent être ajustées en conséquence.

Les CPT des nœuds de type N peuvent être établis à la fois avec la simulation de données et l'expérience d'experts. Lorsque le montant des données sur les accidents est insuffisant ou peu fiable, le CPT pèsera plus sur les expériences des experts que les résultats simulés. Au début de la recherche, l'opinion des experts peut être pesée beaucoup plus haut que les données pratiques en raison de sa petite taille d'échantillon. La réalisation de la simulation de données pour développer des CPT avec une taille d'échantillon limitée peut produire des résultats trompeurs. Ainsi, les CPT sont principalement déterminés par l'expérience des experts. Avec une taille d'échantillon croissante, les données pratiques peuvent être pondérées de manière égale ou supérieure à celles des experts dans le futur. Les questionnaires doivent être développés et distribués pour obtenir un avis d'expert pour les CPT des nœuds de type N des réseaux bayésiens. Comme le montre le tableau 13, la distribution de probabilité totale est classée en sept intervalles.. Dans cette recherche, les questionnaires sont très semblables aux CPT présentés à la figure 16. Les répondants sont invités à choisir l'une des sept catégories pour attribuer la valeur de probabilité dans les CPT de chaque nœud dans le réseau bayésien sauf les nœuds sans nœud parent. Les descriptions de probabilité sont ensuite converties en valeurs de probabilité numériques. Par exemple, si un répondant choisit «très peu possible» pour le compte de la plage de probabilité de «1% à 10%», la probabilité du facteur de risque devrait être de 5,5%. Ensuite, les valeurs de probabilité de tous les répondants sont calculées en moyenne pour obtenir les valeurs de probabilité finales. Afin de maintenir la qualité des données, tous les répondants doivent être invités à répondre à toutes les questions à l'avance.

Intervalle de probabilité	
< 1%	Extrêmement improbable
1–10%	Très improbable
10–33%	Improbable
33–66%	Moyenne probabilité
66–90%	Probable
90–99%	Très probable
> 99%	Pratiquement certain

Tableau 13 : Description de probabilité qualitative

### **Évaluation des probabilités des facteurs des risques liés à la construction et des événements des risques par des avis d'experts**

Les probabilités de facteurs de risque peuvent également être établies à la fois avec les données sur les accidents et l'expérience des experts. Néanmoins, les données sur les accidents réels ne sont pas facilement disponibles, donc les probabilités des facteurs de risque ont été déterminées par l'expérience des experts.

Les questionnaires doivent être développés et distribués pour obtenir des avis d'experts concernant les probabilités des facteurs de risque. Les répondants sont invités à choisir l'une des sept catégories (voir tableau 13) pour attribuer la valeur de probabilité pour chaque facteur de risque. Ensuite, les probabilités des événements de risque sont calculées via le réseau bayésien.

### **Évaluation des effets des risques de la construction**

Dans cette recherche, les implications des risques pour la sécurité de la construction incluent un indice. L'un est mesuré par perte monétaire. La seconde est la victime de l'accident. La victime peut inclure le nombre de blessures et de décès. le nombre de blessures est très difficile à obtenir, de sorte que la mortalité est utilisée pour mesurer la gravité de la victime dans l'accident

## Évaluation des niveaux des risques de la construction

Les risques de la construction sont définis comme le produit des probabilités et des effets des risques. Les niveaux de risque sont déterminés en fonction de la matrice de niveau de risque telle que présentée dans le tableau 14. La zone verte signifie un faible niveau de risque, la zone jaune signifie un niveau de risque moyen et la surface rouge signifie un niveau de risque élevé. Les valeurs de seuil peuvent être modifiées en fonction de la capacité de portance des utilisateurs. Dans cette recherche, les valeurs seuils sont obtenues en fonction des opinions des experts.

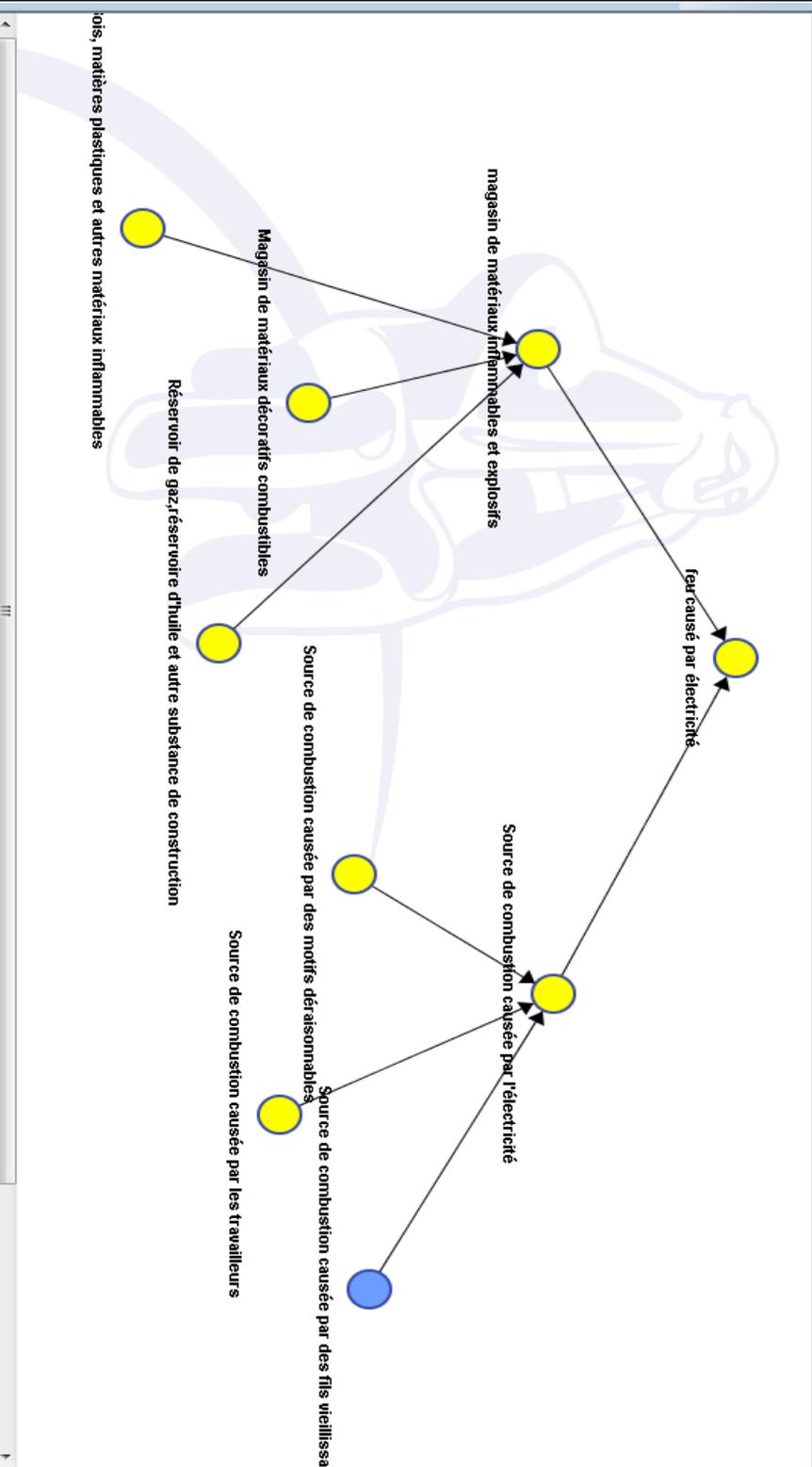
Perte économique	$0 \leq e < 10$ (100000 DZD)	$10 \leq e < 20$ (100000 DZD)	$e \geq 20$ (100000 DZD)
Fatalité			
$0 \leq n < 0.3$			
$0.3 \leq n < 0.6$			
$n \geq 0.6$			

Tableau 14 La matrice des niveaux de risque

## Application pratique des méthodes d'évaluation

### Établissement du risque de construction Réseaux bayésiens

Les structures des réseaux bayésiens sur le chantier ont été développées en fonction de leurs facteurs de risque. Un exemple du risque de sécurité de la construction des réseaux bayésiens est présenté à la figure 19.



magasin de matériaux inflammables et explosifs	81,82%	Vrai	18,39%	Faux
Source de combustion causée par l'électricité	87,20%	Vrai	12,80%	Faux
feu causé par électricité	42,31%	Vrai	57,69%	Faux
Bois, matières plastiques et autres matériaux inflammables	43,30%	Vrai	56,70%	Faux
Magasin de matériaux décoratifs combustibles	40,40%	Vrai	59,60%	Faux
Réservoir de gaz, réservoir d'huile et autre substance de construction	45,60%	Vrai	54,40%	Faux
Source de combustion causée par des motifs déraisonnables	43,10%	Vrai	56,90%	Faux
Source de combustion causée par les travailleurs	51,50%	Vrai	48,50%	Faux

Figure 19 Réseau bayésien de feux causé par l'électricité

## Évaluation des probabilités de risques pour la sécurité de la construction

Les CPT des nœuds de type M du risque de la construction ont été logiquement déduits directement

la base de données sur les accidents de la construction (2011-2015) a été introduite dans les réseaux bayésiens de risque de construction. Les probabilités ont été mises à jour par les données réelles. Les probabilités d'événements de risque liés à la sécurité de la construction ont été priorisées dans l'ordre de leurs probabilités moyennes, comme le montre le tableau 15.

Les risques	Probabilités d'opinions d'experts	Probabilités mises à jour par données réelles
chute	40.1%	78.0%
Blessure mécanique	50.2%	50.2%
Chutes d'objets	41.4%	43.9%
Feu causé par l'électricité	42.9%	42.3%
Incendie /explosion	41.6%	40.6%
Choc électrique	34.9%	35.4%
Effondrement d'échafaudage	34.6%	34.6%
Vapeurs, gaz, poussières, rayonnement	30.5%	31.1%
Manutention manuelle	27.0%	27.0%
Equipements sous pression	19.2%	25.2%

Tableau 15 : Classement des probabilités des événements de risque liés à la sécurité de la construction

## Évaluation des influences des risques pour la sécurité de la construction

La perte économique moyenne et les risques de sécurité liés à la construction ont été obtenus à partir de la base de données sur les accidents de la construction (2011-2015) telle que présentée dans le tableau 16.

Les risques	Perte économique	Fatalité
chute	28.2	1
Blessure mécanique	47.5	1
Chutes d'objets	33.1	1
Feu causé par l'électricité	0.58	0
Incendie /explosion	0.58	0
Choc électrique	34.2	1
Effondrement d'échafaudage	67.3	2.3
Vapeurs, gaz, poussières, rayonnement	3.1	1
Manutention manuelle	29.5	0
Equipements sous pression	33.1	1

Tableau 16 : Les influences des événements de risque liés à la sécurité de la construction

Ensuite, la valeur des risques de la construction a été calculée en fonction des probabilités et des influences des risques de la construction, tel qu'indiqué dans le tableau 17.

Les risques	Perte économique	Fatalité
chute	22	0.78
Blessure mécanique	23.8	0.5
Chutes d'objets	14.5	0.44
Feu causé par l'électricité	0.2	0.00
Incendie /explosion	0.2	0.00
Choc électrique	12.1	0.35
Effondrement d'échafaudage	23.3	0.8
Vapeurs, gaz, poussières, rayonnement	1.1	0.31
Manutention manuelle	8.0	0
Equipements sous pression	8.3	0.25

Tableau 17 : Valeurs de risque de la construction

Les niveaux des risques de la construction ont été obtenus selon le tableau 14, tel que présenté au tableau 18.

Les risques de construction	gravité
chute	élevé
Blessure mécanique	élevé
Effondrement d'échafaudage	élevé
Equipements sous pression	moyen
Choc électrique	moyen
Chutes d'objets	moyen
Vapeurs, gaz, poussières, rayonnement	moyen
Incendie /explosion	faible
Feu causé par l'électricité	faible
Manutention manuelle	faible

Tableau 18 : Les gravités des risques de la construction

## Conclusion

Selon les résultats, Chute, blessure mécanique et effondrement d'échafaudage ont été les risques de sécurité les plus graves sur les chantiers de construction. Les gestionnaires de projet et les superviseurs de sécurité devraient être plus attentifs au contrôle des facteurs de risque liés à ces trois événements de risque, par exemple, renforcer la gestion des installations de protection du site, renforcer la réglementation des équipements de protection individuelle, renforcer l'inspection et la maintenance des machines, doubler vérifiez le schéma de conception des échafaudages, et ainsi de suite.

## **Conclusion générale :**

Le principal risque de la construction (Effondrement d'échafaudage, catastrophes incendie, chute, blessures mécaniques, chocs électriques et grève) ont été construits en fonction des avis d'experts des entreprises de construction et des données sur les accidents réels. Les informations provenant des avis d'experts et des données réelles ont été incorporées dans les réseaux Bayésiens de sécurité de la construction. Les résultats de l'évaluation pourraient être mis à jour facilement lorsque de nouvelles données ont été collectées. Les résultats ont montré que la chute, blessures mécaniques et l'effondrement d'échafaudage étaient les risques de sécurité les plus graves sur le chantier de construction. Avec cette approche, les gestionnaires de projet pourraient évaluer de manière exhaustive les risques ou comprendre les causes d'un accident avec des interrelations complexes entre les facteurs de sécurité et les événements, au future l'approche d'évaluation des risques de construction doit être validée entre différentes régions et différentes entreprises lorsque d'autres données sont obtenues

# Les références

- [1] Abdelhamid, T. S., Everett, J. G.. (2000) Identifying Root Causes of Construction Accidents, *Journal of Construction Engineering and Management*, 126(1) .
- [2] Aneziris, O. N., Papazoglou, I. A., Baksteen H, et al. (2008) Quantified risk assessment for fall from height, *Safety Science*, 46(2): 198-220.
- [3] Grassi, A., Gamberini, R., Mora, C., et al. (2009) A fuzzy multi-attribute model for risk evaluation in workplaces, *Safety Science*, 47(5): 707-716.
- [4] Hallowell, M. R., Gambatese, J. A. (2009). Activity-Based Safety Risk Quantification for Concrete Formwork Construction, *Journal of Construction Engineering and Management*, 135(10).
- [5] Patt, A. G., Schrag, D. P.. (2003) Using Specific Language to Describe Risk and Probability, *Climatic Change*, 61(1): 17-30.
- [6] Heckerman, D.. (1997) Bayesian Networks for Data Mining, *Data Mining and Knowledge Discovery*, , 1(1): 79-119. (Patt, AG, Schrag, D. P, 2003)
- [7] Pearl, J. (1988) *Probabilistic reasoning in intelligent systems: networks of plausible inference*, San Francisco, CA, USA: Morgan Kaufmann Publishers Inc.
- [8] Walton, A., Meidinger, D.. (2006) Capturing expert knowledge for ecosystem mapping using Bayesian networks, *Canadian Journal of Forest Research*, 36(12): 3087-3103.
- [9] Martin, J. E., Rivas, T., Matias, J. M., et al. (2009) A Bayesian network analysis of workplace accidents caused by falls from a height, *Safety Science*, 47(2): 206-214.
- [10] Matias, J. M., Rivas, T., Martin, J. E., et al. (2008) A machine learning methodology for the analysis of workplace accidents, *Int. J. Comput. Math*, 85(3-4): 559-578.
- [11] INRS (Institut National de Recherche et de la Sécurité) – France
- [12] Centre national de la recherche scientifique – France
- [13] Risques.professionnels.ameli.fr
- [14] [P NAIM, P HENRI, K WUILLEMIN, P LERAY, O POURRET, A BECKER], « Réseaux Bayésiens ». 3ème Edition, Eyrolles. 2007.
- [15] [Toufik AGGAB]; « Evaluation prévisionnelle de la sureté de fonctionnement d'un système industriel utilisé dans un contexte de maintenance dynamique ». Mémoire de magister, Université M'hamed Bouguerra-Boumerdes, Département maintenance industriel. 2011.
- [16] [Philippe WEBER, Marie-Christine SUHNER], « Modélisation de processus industriels par Réseaux Bayésiens Orientés Objet (RBOO) ». Rapport de recherche (Communication), Manuscrit auteur, publié dans "Revue d'Intelligence Artificielle 18 (2004) 299-326". Centre de Recherche en Automatique de Nancy (CRAN), France. 2004

[17] [Mourad HOUHOU], « Evaluation de la fiabilité et de la disponibilité des systèmes mécaniques par la méthodologie ArdeBayes ». Mémoire de magister, Université M'hamed Bouguerra-Boumerdes, Département maintenance industriel. 2012.

[18] [Lobna BOUCHAALA et Slaheddine JARBOUI] ; « Application des Réseaux Bayésiens à la Modélisation et la Planification des Réseaux ». 5th International Conference: Sciences of Electronic, Technologies of Information and Telecommunications, 2009 – TUNISIA

[19] [G MEDINA-OLIVA, P WEBER, B IUNG], « Modélisation, à base de Réseaux Bayésiens, d'un système de maintenance industriel et de son environnement pour l'évaluation de ses stratégies de maintenance ». 4èmes Journées Doctorales / Journées Nationales MACS, JD-JN-MACS, Marseille : France (2011) 98

[20] [Alberto PASANISI, Eric PARENT], « Modélisation bayésienne du vieillissement des compteurs d'eau par mélange de classes d'appareils de différents états de dégradation ». Revue de statistique appliquée, tome 52, n°1(2004), société française de statistique.

[21] [Sylvain VERRON], « Diagnostic et surveillance des processus complexes par Réseaux Bayésien » ; Thèse de doctorat ; Ecole doctorale d'Angers, 2007.

[22] [Kamal MEDJAHHER, Amine MECHRAOUI, Nouredine ZERHONI]; « Diagnostic et pronostic de défaillances par réseaux bayésiens ». 4èmes Journées Francophones sur les Réseaux Bayésiens, JFRB'2008, Lyon : France (2008)

[23] [M.-F. BOUAZIZ, E. ZAMAĬ, S. HUBAC] ; « Modélisation de l'état de santé d'un équipement de fabrication par une méthode probabiliste : Application aux ateliers semi-conducteurs ». 9e Conférence Internationale de Modélisation, Optimisation et Simulation - MOSIM'12- 2012 Bordeaux – France.

[24] [Anass BOUCHIBA]; « Evaluation de dysfonctionnement d'un système par approche Bayésienne : cas du système ferroviaire ». Thèse de doctorat ; Ecole doctorale d'Angers, Ecole doctorale de l'EMI ; 2013.

[25] [Leïla BOUZAÏENE-MARLE] ; « Anticipation du Vieillissement par Interrogation et Stimulation d'Experts ». Thèse de doctorat, Ecole Centrale Paris, discipline : génie industriel, 2005.

[26] [Samira DJEHICHI, Salima ZEGHDANI], « Mécanisme de gestion des risques Industriel Etude de cas : NAFTAL. GPL-Batna », Mémoire d'ingénieur d'état, Université HADJ LAKHDAR-Batna, Département Génie Industriel, 2010.