



MINISTRE DE L'ÉDUCATION NATIONALE  
ET DE LA RECHERCHE



## MASTER de RECHERCHE

### DOMAINE SCIENCES ET TECHNOLOGIES

Mention « Conception Industrialisation pour le développement durable »

Spécialité « Conception, Industrialisation et Innovation »

Année 2007-2008

# Management des Risques basé sur la Logique Floue pour la Maintenance d'une Turbine Francis

---

Rapport de PFE

Diego TOBON

---



Directeur du laboratoire : Nidhal REZG

Directeur de recherche : Nidhal REZG

Encadrants : Sophie HENNEQUIN

Francisco BOTERO



## REMERCIEMENTS

---

D'abord je voudrais tout particulièrement remercier mon directeur de recherche Nidhal REZG, Professeur à l'UFR MIM et Directeur du Laboratoire de Génie Industriel et de Production de Metz (LGIPM), et mon encadrant de stage Mme Sophie HENNEQUIN, Maître de Conférences à l'ENIM, qui m'ont accompagné tout au long des diverses actions de mon étude et qui ont toujours été disponibles pour donner une réponse à chacune de mes questions.

Merci à Messieurs Francisco BOTERO, Leonel CASTAÑEDA, Jaime BARBOSA et German BETANCOURT, mes interlocuteurs directs à l'EAFIT avec lesquels j'ai travaillé en parallèle. Ils étaient toujours prêts à m'aider et très enthousiastes pour la réalisation de cette étude.

Je tiens aussi à remercier l'ensemble de l'équipe du LGIPM et du laboratoire GEMI (groupe d'études en maintenance industrielle) à l'EAFIT pour leurs efforts et disponibilité.

## TABLE DES MATIÈRES

---

REMERCIEMENTS.....	2
TABLE DES MATIÈRES .....	3
AVANT PROPOS .....	4
1. INTRODUCTION .....	5
1.1. HISTOIRE .....	5
1.2. TURBINE FRANCIS .....	6
1.3. SITUATION ACTUELLE .....	7
1.4. OBJECTIFS .....	8
2. POSITIONNEMENT .....	9
2.1. MAINTENANCE .....	9
2.1.1. CONTEXTE ACTUEL .....	10
2.1.2. PROGRAMMES DE RECHERCHES.....	10
2.2. MÉTHODE AMDEC.....	11
2.2.1. METHODOLOGIE .....	12
2.3. LOGIQUE FLOUE .....	14
2.3.1 COUPLAGE LOGIQUE FLOUE ET MAINTENANCE.....	14
2.4. LA METHODE PERT .....	15
2.4.1. MISE EN ÉQUATION.....	15
3. SYSTÈME ETUDIE .....	16
3.1 ANALYSE DU SYSTÈME .....	17
3.2 ESTIMATION DES RISQUES .....	19
3.2.1. DÉTECTION .....	20
3.2.2. OCCURRENCE .....	21
3.2.3. GRAVITE.....	21
3.2.4. CRITICITÉ.....	22
3.3. EVALUATION DES RISQUES.....	23
3.3.1. MODÈLE A TROIS VARIABLES AMDEC.....	23
3.3.2. MODÈLE A DEUX VARIABLES AMDEC.....	26
3.4. PLANIFICATION DE LA MAINTENANCE .....	27
3.5. CONCLUSIONS PARTIELLES .....	30
4. RESULTATS.....	31
4.1. MODÈLE À TROIS VARIABLES.....	31
4.1.1. MODÈLE A 53 RÈGLES.....	31
4.1.2. MODÈLE A 125 RÈGLES .....	33
4.1.3. CHOIX DU MODÈLE .....	34
4.2. MODÈLE À DEUX VARIABLES .....	34
4.3. UNE AUTRE MÉTHODE DE DÉFUZZIFICATION.....	35
5. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES.....	37
6. BIBLIOGRAPHIE.....	39
7. ANNEXES.....	40

## AVANT PROPOS

---

Pour faciliter la maintenance de groupes hydroélectriques et assurer la production en énergie électrique, nous avons réalisé l'étude et l'estimation des risques potentiels pour une turbine Francis actuellement en activité dans une centrale hydroélectrique en Colombie. Cette étude a été difficile à construire, mais nous sommes fiers d'avoir conçu un système d'aide à la décision pour la planification de tâches de maintenance préventive. Ce système d'aide à la décision ne rassemble pas l'étude de tous les composants de la turbine Francis car la durée du stage n'étant que de 20 semaines, nous n'avons pas eu le temps de réaliser un module complet mais c'est une première étape qui devra être développée avec les résultats fournis par l'EAFIT, Université partenaire du projet en Colombie, de façon à avoir un système viable pour la centrale hydroélectrique installée en Colombie.

Dans ce rapport, la problématique et le contexte industriel sont donnés en introduction. Une présentation concise des méthodes et modèles que nous avons utilisés, comme la méthode AMDEC, la méthode PERT et la logique floue, est également proposée. Dans une troisième partie, nous donnons et expliquons la méthode mise en place et précisons les composants et défaillances que nous avons plus particulièrement étudiés. La quatrième partie vous présente la partie gestion des risques pour la planification de la maintenance. Enfin, nous terminons ce rapport par quelques conclusions et perspectives de recherche.

## 1. INTRODUCTION

---

### 1.1. HISTOIRE

Le 26 octobre 2004, le Président Colombien Alvaro Uribe Velez a mis en service à Frontino (Antioquia) les centrales hydroélectriques de la Herradura (*Figure 1*) et la Vuelta dans la région d'Antioquia. Grâce à ces deux centrales, le système électrique de la région a été grandement amélioré et les risques de rupture en approvisionnement électrique sont devenus quasi nuls.



*Figure 1. Centrale de la Herradura. Source: EPM*

La mise en fonctionnement de la Vuelta et la Herradura a permis de rajouter 31,5 MW au système électrique existant à l'époque.

Pour la région, ce développement permet de renforcer l'approvisionnement d'énergie de la zone, caractérisée par le passé par une prestation de service insuffisante, avec de fréquentes fluctuations de la tension. En matière de transport électrique ce projet permet également de suppléer à la nécessité de construire des lignes de renforcement supplémentaires vers la région.

Le projet fut développé par la société Empresas Publicas de Medellin (EPM). Il a demandé un investissement de 45 millions de dollars, et la construction a duré trois ans et à générer 300 emplois directs pendant sa réalisation. Les deux centrales ont été construites entre les villes d'Abriaquí, Cañasgordas et Frontino, à l'ouest de la région d'Antioquia. Ces installations utilisent l'eau apportée par le fleuve la herradura.

La centrale de la vuelta se trouve entre les villes de Frontino et Abriaqui. Elle a une capacité de 11.7 MW. La centrale de la herradura, se trouve entre les villes de Frontino et Cañasgordas et a une capacité de 19.8 MW.

Le projet comprend deux barrages contruits en béton conventionnel, avec deux tubes de pression, deux tubes aspirateur-diffuseur, deux trappes à sable et deux salles de machines avec des unités de génération de type Francis (*Figure 2*).

Un des bénéfices pour la région est, en plus de la sûreté de leur système électrique, d'avoir plus de revenus grâce aux privilèges apportés selon la législation écologique de la Colombie, qui représente environ 200.000€ par an.

Ce projet a réussi grâce à la participation des industries colombiennes, russes, ukrainiennes, allemandes et portugaises [Empresas Publicas de Medellin, 2006].



Figure 2. Turbine Francis à « la herradura ». Source: EAFIT

## 1.2. TURBINE FRANCIS

Communément, une turbine hydraulique est une machine qui permet de générer de l'énergie mécanique par la transformation de l'énergie potentielle contenue dans une masse d'eau. Cette dite énergie mécanique est ensuite transformée en énergie électrique (électricité) par un ingénieux système de rotor-stator, aussi appelé alternateur (voir Annexe 1).

### Cas considéré

Le groupe hydroélectrique qui nous intéresse consiste en un montage d'axe horizontal avec les caractéristiques suivantes :

- Possibilité d'installer plusieurs roues sur le même axe, ce qui permet de réduire la taille des conduits ou de mettre en service une roue d'appui pendant une intervention de maintenance. Le montage actuel ne comprend qu'une seule roue par axe. [VARLET, 1964]
- Le montage horizontal demande un développement du bâtiment en longueur car le montage turbine - alternateur se fait cote à cote, ce qui demande plus d'espace par rapport à un montage d'axe vertical. Dans notre cas la solution d'axe horizontal a été adoptée car il n'y avait pas de limitations grandes par rapport à la taille de la salle de machines (Figure 9)



Figure 3. La herradura. Source: EAFIT

- Comme la puissance des turbines est moyenne, les dimensions de ses composants ne sont pas trop élevées et encombrantes, donc, comme la taille de la bêche spirale est prudent, il est facile de mettre en place une assise solide et rigide pour éviter toutes vibrations [VARLET, 1964].
- L'arbre horizontal est le plus commode, d'autant plus si la roue est établie en porte-à-faux (comme c'est le cas), le montage et l'entretien deviennent particulièrement faciles [VARLET, 1964].
- Les groupes à axe horizontal reposent sur des paliers, tandis que les groupes à arbre vertical sont suspendus à un pivot. Si le pivot grippe, l'alternateur est immobilisé; il faut plusieurs semaines pour remplacer le pivot [VARLET, 1964].
- Pour réduire les effets coup de bélier, il faut procéder à une fermeture lente du distributeur ; mais, pour éviter à l'alternateur de trop grands écarts de vitesse pendant une décharge brusque, il faut munir le groupe d'un volant qui augmente l'inertie du groupe, ce qui est plus facile à faire sur un montage horizontal [VARLET, 1964].

## Conclusion

Comme nous pouvons voir un groupe hydroélectrique est un système très complexe, avec beaucoup de variables donc, forcément difficile à modéliser et étudier. C'est pourquoi, dans cette étude, nous nous limiterons à un composant de la turbine. Pour effectuer ce choix nous utiliserons l'information trouvée dans la thèse de Mademoiselle Luisa Fernanda GUARNIZO GOMEZ [GUARNIZO GOMEZ, 2007], dans laquelle toutes les variables intéressantes à mesurer lors du diagnostic de la turbine sont présentées. Dans son travail, les défaillances les plus courantes pour ce type de systèmes et les composants auxquelles elles sont associées sont également détaillées.

### 1.3. SITUATION ACTUELLE

Actuellement la vuelta et la herradura travaillent sans arrêt, mais la diminution des saisons de pluie et les pannes, que sont de plus en plus fréquentes, commence à générer des problèmes par rapport à la production régulière en énergie.

Le changement climatique génère aujourd'hui des saisons de forte pluie et des périodes de sécheresse. Pendant l'époque de manque d'eau la station doit continuer sa production avec un niveau inférieur cependant au nominal, et pour cela il faut diminuer le débit de fonctionnement. La diminution du débit de fonctionnement en dessous du débit de conception peut nous amener à des situations dangereuses, il peut se produire un phénomène qui augmente l'usure et les vibrations, une augmentation de ces dernières conduisant à la destruction du système.

Du fait d'une erreur de conception, les systèmes de récupération du sable (des trappes à sable) ont été sous-dimensionnés, donc ils n'arrivent pas à récupérer tout le sable qui passe par le tube de pression (admission), ce sable engendre un dégât des composants. Le remplacement de ces composants est très laborieux car il nécessite d'arrêter l'installation (et par conséquent arrêter la production en énergie) et les composants sont des pièces lourdes et encombrantes.

Il est cependant impératif pour la région de maintenir sa production en énergie car ces centrales, en plus d'approvisionner en énergie, génèrent des emplois pour la région. [PRESIDENCIA DE LA REPUBLICA, 2006]

#### 1.4. OBJECTIFS

D'une façon générale, nous souhaitons concevoir un système permettant de répondre aux besoins suivants :

- Réduire le temps et le coût engendré par la maintenance corrective.
- Réduire les temps improductifs (temps d'arrêt)
- Augmenter la productivité
- Améliorer la sécurité au travail
- Augmenter les revenus de l'entreprise.
- Améliorer la conception de la turbine.

Ces objectifs seront réalisés dans le cadre d'une coopération entre l'Université EAFIT à Medellin en Colombie et plus particulièrement le laboratoire GEMI et notre laboratoire, le LGIPM. Le laboratoire GEMI est spécialisé en diagnostic, notre collaboration se limitera donc à une pré-étude du management des risques pour la maintenance de la turbine Francis. Les données collectées par l'EAFIT au moment du début du stage étant insuffisantes, nous avons donc décidé d'utiliser l'intelligence artificielle pour compiler les informations et avoir une bonne vision du problème. Plus précisément, nous avons choisi d'utiliser la logique floue qui permet d'avoir une bonne vision d'un système simplement à partir de la description humaine que l'on peut en faire.

## 2. POSITIONNEMENT

---

Pour répondre à une partie des objectifs, nous avons choisi de définir un plan de maintenance basé sur la gestion des risques d'un composant de la turbine Francis. Ainsi, dans cette partie, nous allons présenter brièvement les différents outils que nous avons utilisés dans notre démarche.

### 2.1. MAINTENANCE

La maintenance des systèmes industriels est devenue un point essentiel lors de leur conception et de leur exploitation, tant pour des questions de sécurité et de sûreté de fonctionnement, que pour des questions de rentabilité. Par exemple, un arrêt de production pour maintenance sur les chaînes de montage de Peugeot peut coûter jusqu'à cent cinquante mille euros par jour. Une maintenance mal adaptée à un système peut également conduire à une situation critique, dangereuse aussi bien pour les personnes que pour le matériel ou l'environnement.

Ceci explique l'importance toujours croissante de la maintenance, et ce sous les formes les plus diverses. Jusqu'à une date récente, les techniques de maintenance curative ou de maintenance préventive (généralement de la maintenance préventive systématique) étaient les seules pratiquées. La seconde n'est toutefois pas toujours applicable du fait du nombre de ressources humaines et matériel nécessaires, tandis que la première entraîne un surcoût d'exploitation non négligeable pour l'entreprise qui la pratique.

En réponse à ce problème est apparu un type de maintenance dite prédictive, ou encore conditionnelle. Ce principe consiste à mesurer simultanément plusieurs paramètres du système à surveiller, à analyser ces données pour détecter l'apparition d'une défaillance potentielle, et à réagir de la façon la plus appropriée et la plus rapide possible en cas de problème. Il est à noter qu'actuellement près de 50% des mesures ainsi effectuées en maintenance prédictive sont des mesures de type vibratoire (vibrations acoustiques, mécaniques, etc.). Notre modèle s'inscrit dans le cadre des outils d'aide à la décision pour la maintenance prédictive et la définition de politiques de maintenance pour assurer la disponibilité de la turbine Francis.

Dans le cadre d'une maintenance prédictive, plusieurs étapes sont nécessaires. Il faut dans un premier temps analyser de façon approfondie la structure du système, afin d'optimiser le nombre et le positionnement des capteurs requis. Cette phase demande des connaissances techniques et théoriques très spécifiques, et le plus souvent l'intervention d'un laboratoire de recherche spécialisé dans ce domaine (dans notre cas le laboratoire GEMI a effectué cette démarche). Puis, les capteurs adaptés aux pièces à surveiller (capteurs de température, de courant, de vibrations, de son, etc.) doivent être montés sur l'installation et reliés à un système informatique de supervision, système adapté aux caractéristiques de chaque capteur présent sur le réseau ainsi formé. Ce système joue le rôle d'interface entre les résultats de la surveillance effectuée et un opérateur de maintenance. Il doit également être capable d'auto-décision dans certains cas (arrêt d'urgence du système), lorsqu'une intervention humaine risque d'être trop lente pour assurer une sécurité minimale donnée.

La mise en place d'un véritable système de maintenance prédictive étant très coûteux (réalisation d'un modèle mathématique du système pour caractériser l'endommagement des pièces, réseau de capteurs pour mesure les paramètres nécessaires, calculateur dédié pour

traiter les données ainsi récupérées, système de supervision effectuant l'interface avec un opérateur humain ou au pire prenant les mesures nécessaires pour arrêter le système), elle n'est utilisée que sur de grands systèmes. Néanmoins, l'émergence de nouvelles techniques de surveillance et de caractérisation de l'endommagement ainsi que de supervision, moins onéreuses et moins contraignantes, devrait permettre à terme la diffusion de cette technologie vers de très nombreuses applications industrielles (en milieu PME-PMI notamment).

### **2.1.1. CONTEXTE ACTUEL**

Les orientations technologiques visent actuellement à permettre le fonctionnement d'un système industriel affecté d'une ou de plusieurs pannes non critiques, jusqu'à ce que la maintenance ou le remplacement des pièces incriminées puisse être effectué. Ceci générera des gains de productivité ainsi qu'une sécurité accrue dans un grand nombre de secteurs industriels.

Les évolutions futures visent également la mise au point de capteurs plus génériques et plus précis que ceux existant actuellement, afin de faciliter leur implantation et leur gestion. L'amélioration de la capacité de réaction et de synthèse des systèmes de supervision est également à l'étude, notamment par l'emploi de systèmes experts de plus en plus évolués exploitant des bases de données relationnelles.

Ces orientations visent également à rendre accessible aux P.M.E. / P.M.I. la technologie actuelle de maintenance prédictive, car sa mise en oeuvre étant longue (de 1 à 4 ans) et spécifique à chaque système, elle reste très onéreuse. Dans l'optique de réduire ses coûts d'implantation sur un système, le but visé à long terme est le développement de cette technologie sous la forme d'une "boîte à outils " directement utilisable par un simple paramétrage de ses composants.

### **2.1.2. PROGRAMMES DE RECHERCHES**

Plusieurs programmes de recherche sont en cours dans ce domaine et portent essentiellement sur les points suivants:

- Amélioration de la fiabilité des algorithmes d'analyse et de décision utilisés par les systèmes de supervision.
- Recherche de nouveaux indicateurs de l'endommagement d'une pièce (vibrations acoustiques, vibrations mécaniques, déformations, rayonnements thermique, etc.)
- Utilisation de nouvelles technologies informatiques d'aide à la décision : logique floue, réseaux de neurones, réseaux neuro-flous. Ces technologies sont utilisées pour la résolution de cas incertains, lorsque l'existence d'une panne est probable mais pas certaine. Au lieu de générer une décision binaire du type " Pièce N1 dégradée / Pièce N1 opérationnelle ", on génère une information du type " Pièce N1 est à 63% de son état optimal.
- Reconfiguration en temps réel des paramètres d'un système de supervision, dans le but de maintenir un fonctionnement correct d'une installation, malgré la présence

d'une ou plusieurs pannes mineures. Le programme MAINE-DIALOGS (Eurêka) consiste à cet égard en la mise au point d'un système générique de supervision, pouvant se greffer sur n'importe quel type de système, évitant ainsi le coût de développement d'un système de supervision dédié à chaque nouvelle installation. Les partenaires industriels et universitaires impliqués dans ce projet sont : F.M.A., Siemens, Macq Electronique, A.E.A. Technology, l'Université Libre de Bruxelles, le C.N.R.S. (C.R.A.N., Université de Nancy) et l'Université de Duisburg.

- Recherche sur les évolutions possibles des capteurs actuels vers des capteurs sans fils ou des capteurs dits " intelligents ", destinés à fiabiliser et à faciliter l'installation d'un réseau de capteurs (thématique d'une thèse lancée en collaboration entre l'EAFIT et l'EPFL).
- Enfin, dans le cadre de BRITE-EURAM II, de nombreux projets de recherche ont été lancés avec le soutien de la Commission Européenne, portant principalement sur l'amélioration des outils de mesure, le développement de systèmes de diagnostic basés sur l'intelligence artificielle, l'utilisation de la fibre optique [evariste, 1996].

Notre démarche s'inscrit en partie dans ce contexte de recherches et nous proposons d'utiliser la méthode AMDEC couplée à la logique floue pour définir un outil d'aide à la décision pour la planification de politiques de maintenance. Cet outil d'aide à la décision intègre la notion de risque qui est un élément incontournable dans une centrale hydroélectrique en activité. Notre étude ne se déroulant que pendant 5 mois (durée du Projet de Fin d'Etudes de l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Metz), elle a été simplifiée de façon à fournir des résultats utilisables et publiables à la fin du stage.

## 2.2. MÉTHODE AMDEC

Pour la gestion des risques et l'évaluation des défaillances, nous proposons d'utiliser la méthode AMDEC [Garin, 1994]. Cette méthode a été développée par l'armée américaine sous la référence Militaire MIL-P-1629, intitulée "Procédures pour l'Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et leurs Criticités, et est datée du 9 Novembre 1949. Cette méthode était employée comme une technique d'évaluation des défaillances afin de déterminer la fiabilité d'un équipement et d'un système. Les défaillances étaient classées selon leurs impacts sur le personnel et la réussite des missions pour la sécurité de l'équipement. Le concept d'équipements interchangeables ne s'appliquant pas dans le monde moderne de fabrication de biens de consommation, les entreprises de produits de consommation ont donc établi de nouvelles valeurs telles que la sécurité et la satisfaction client. Les études alors réalisées ont donné naissance à la norme ISO 9000 dégradée en norme QS 9000 par l'industrie automobile. Conformément au QS 9000, les fournisseurs automobiles doivent utiliser la planification du procédé 'planification qualité du procédé' (APQP), incluant l'outil AMDEC. La planification qualité du procédé est une méthode structurée permettant de définir et d'établir les étapes nécessaires à la fabrication d'un produit satisfaisant aux exigences du client. Les plans de contrôle aident le fabriquant à produire des produits de qualité selon les exigences du client. Un accent est mis sur la minimisation de la variation du produit et du procédé. Les fournisseurs doivent utiliser l'AMDEC dans la planification qualité du procédé et dans le développement de leurs plans de contrôle. L'AIAG (Automotive Industry Action Group) et l'ASQC (American Society for Quality Control) émettent les normes AMDEC en février 1993. Les normes sont présentées dans un manuel de l'AMDEC approuvé et soutenu par trois constructeurs

automobiles. Ce manuel fournit les principes généraux pour préparer une AMDEC. Ces pages sont destinées à comprendre l'utilisation de l'AMDEC dans l'industrie automobile américaine.

Une AMDEC est défini comme un procédé systématique permettant d'identifier les modes potentiels et traiter les défaillances avant qu'elles ne surviennent, avec l'intention de les éliminer ou de minimiser les risques associés.

### 2.2.1. METHODOLOGIE

L'AMDEC est une méthode d'analyse des risques dysfonctionnels basée sur l'établissement de relations de cause à effet. Elle s'appuie sur l'identification des modes de défaillance des composants d'un système. Pour une bonne analyse des modes de défaillance, il faut donc identifier les causes d'apparition. Ces premiers éléments constituent les bases de l'analyse qualitative de fonctionnement du système.

Mais le but de la méthode AMDEC est de pouvoir également quantifier l'importance du risque lié à chaque effet. Trois critères sont ainsi définis :

- La fréquence d'apparition ou occurrence de l'incident (qui sera notée O) : on peut ainsi estimer qu'un certain genre d'incident risque d'arriver une fois par an. Une variante de la fréquence temporelle est de dire (par exemple dans l'industrie ou des machines-outils fabriquent des pièces à la chaîne) qu'une pièce ayant tel défaut sera produite toutes les 10000 pièces. C'est le premier critère auquel on pense, le plus intuitif en matière de sécurité, de maintenance et de disponibilité.
- La gravité (notée G), qui est calibrée selon les critères de satisfaction du client (toujours au sens large, c'est à dire le client de l'entreprise, l'utilisateur, l'entreprise elle même, l'ensemble de la population quand il s'agit de sécurité publique, etc.). De manière générale, on fait apparaître dans l'échelle de la gravité, en parallèle, la notion de danger associé à la défaillance. Toute atteinte à la sécurité de l'utilisateur ou du public est ainsi décliné par un niveau élevé de la gravité. Dans le cas d'une entreprise, on réalise en parallèle une étude de la gravité pour l'entreprise, qui se résume en fait souvent par une mesure de l'impact des défaillances sur les coûts. Ce facteur est en fait le plus difficile à évaluer, et pose des problèmes quand il s'agit de sécurité : en effet, comment chiffrer la mort de vies humaines, comme il faudrait le faire quand on étudie les risques de déraillement d'un train par exemple ?
- La détection (notée D), est un facteur auquel on pense de façon beaucoup moins immédiate. Elle est calibrée en fonction des moyens de mesure de l'apparition des causes de dysfonctionnement mis en œuvre.

Ces trois indicateurs sont ensuite synthétisés par un indicateur appelé criticité, défini traditionnellement comme le produit des trois critères précédents (Equation 1).

$$C = O \times G \times (1 - D) \quad (1)$$

Ainsi, la criticité sera d'autant plus importante que l'incident se produit souvent (fréquence élevée), qu'il est grave en conséquence (G), et qu'il ne pourra pas être détecté avant

apparition. Le but de la démarche AMDEC est ainsi de ramener la criticité à un seuil inférieur à celui convenu au début de l'étude.

La mise en œuvre de l'AMDEC demande cependant la disponibilité d'un certain nombre de compétences : le pilote technique (responsable de l'étude jusqu'à l'aboutissement des actions), un animateur (garant de l'application de la méthode), un concepteur (qui maîtrise le système), un responsable de production et de maintenance. Bien entendu, le groupe peut être enrichi par des spécialistes de technologies particulières mises en œuvre dans le système étudié.

De part son rôle, une analyse AMDEC doit commencer par une analyse fonctionnelle du système, afin d'identifier les fonctions qu'on attend de lui. En effet, dans l'étude AMDEC une défaillance équivaut à une fonction non remplie. Ainsi, parmi les critères caractérisant une fonction, ceux concernant la sûreté de fonctionnement doivent être clairement affichés. D'autre part, les dysfonctionnements étant liés aux solutions techniques mises en œuvre pour réaliser ces fonctions, une description des solutions techniques est une donnée essentielle à l'analyse AMDEC.

La mise en œuvre se décompose en 7 étapes :

- 1) Initialisation, qui définit le périmètre de l'étude.
- 2) Préparation (qui consiste en fait à collecter l'ensemble des données nécessaires à l'étude, comme par exemple l'historique de la maintenance, la fiche produit, les spécifications, etc.).
- 3) Identification des modes de défaillance.
- 4) Évaluation et hiérarchisation des modes de défaillance. C'est une étape déterminante : pour chaque mode de défaillance, on évalue les trois critères O, G et D.
- 5) Recherche d'actions préventives : on considère qu'un mode de défaillance est acceptable si sa criticité est inférieure à une valeur seuil (en général cette valeur seuil est égale à 100) et/ou  $G < 8$  (la gravité étant généralement notée de 1 à 10). Si tel n'est pas le cas, on détermine des actions destinées à ramener le niveau de risque à des valeurs acceptables. Ensuite, on réévalue la criticité avant de mettre en œuvre ces actions.
- 6) Mise en œuvre des solutions.
- 7) Contrôle d'efficacité. Cela correspond au suivi de l'efficacité immédiate et dans le temps des améliorations apportées au fonctionnement du système. Ensuite, un calendrier est établi pour permettre un suivi dans le temps du contrôle de l'efficacité du système, et afin d'assurer un rebouclage sur la tenue des objectifs initiaux.

La clé du succès de la méthode réside dans l'énoncé d'objectifs clairs à atteindre, tant en terme de sûreté de fonctionnement qu'en terme de coûts des solutions mises en œuvre. Le périmètre de l'étude en conditionne la complexité.

L'AMDEC est une méthode rigoureuse : elle doit être mise en œuvre par un animateur AMDEC la connaissant parfaitement et possédant des qualités d'animateur de groupe. Il est fréquent de lier une démarche d'analyse AMDEC avec une démarche d'analyse de la valeur, ce qui

permet de tenir, outre les objectifs de sûreté de fonctionnement, des objectifs de coûts et de productivité. C'est pourquoi, dans ce cas, l'animateur devra bien entendu maîtriser les méthodes d'analyse de la valeur.

Lorsque les données ne sont pas parfaitement connues ou lorsque l'évaluation de la détection, de l'occurrence et/ou de la gravité est difficile à mener, la logique floue peut être utilisée.

### **2.3. LOGIQUE FLOUE**

La conception et la mise en œuvre de systèmes de production avancés, de logiciels d'aide à la décision et de postes de supervisions de procédés industriels, se caractérisent par la constante manipulation d'informations dont beaucoup sont subjectives, imprécises, vagues, incertaines. Mener à bien cette information afin de trouver une meilleure liaison entre l'homme et son environnement est indispensable.

Depuis plusieurs années l'homme a traité l'information en se limitant à vrai ou faux. C'est-à-dire, en utilisant ce qu'on connaît comme la logique booléenne. Mais, du fait du fort développement informatique, le traitement de l'information doit être plus précis et ajusté à la réalité.

La logique floue peut être définie comme de la logique booléenne qui a été étendue pour réunir le concept de vérité partielle. Dans la logique booléenne nous avons des valeurs de vérité entre "vrai complètement" et "complètement faux" (0 ou 1). Avec la logique floue on utilise toutes les valeurs possibles comprises entre 0 et 1.

La logique floue est basée sur la théorie des ensembles flous introduits par Lotfi A. Zadeh en 1965 [Zadeh, 1965], pour plus d'information voir l'annexe 2.

#### **2.3.1 COUPLAGE LOGIQUE FLOUE ET MAINTENANCE**

Plusieurs études ont utilisé la logique floue pour faciliter certaines étapes de la maintenance. Le but de ce paragraphe n'est pas de citer la totalité des travaux associant la logique floue à la maintenance en général mais de présenter quelques travaux en relation qui ont motivé notre étude.

La logique floue a par exemple été utilisée pour l'aide à la décision lors de l'intégration des politiques de maintenance avec la gestion de production [Gomez, Hennequin, & Rezg, 2007], mais également pour modéliser certaines notions difficilement quantifiable autrement [Arango, Hennequin, & Rezg, 2007] et [Hennequin, Arango, & Rezg] Comme nous l'avons vu, la logique floue permet en effet d'intégrer et de modéliser des notions qui sont vagues ou représentées linguistiquement.

La logique floue est également utilisée pour la définition des défaillances lors du diagnostic. On peut par exemple citer le travail développé par [Ying-Ming Wang, 2008] dans lequel nous trouvons un modèle pour déterminer la criticité se basant sur des poids flous pour définir les variables d'entrée. Ces poids ont permis de mieux estimer la criticité car le modèle proposé est réaliste et simple. Dans les travaux de [K. Xu, 2002], une utilisation de la logique floue pour déterminer des pannes et leur répercussion sur d'autres défaillances est proposée. Cette méthode nous permet d'explorer les notions d'indépendance et dépendance des différents modes de défaillance, c'est à dire quels modes de défaillance ont des relations entre eux

(dépendance) et quels modes ne dépendent pas des pannes apparues sur d'autres composants (indépendance) tout en gérant l'incertitude avec la logique floue.

Nous présentons rapidement dans ce qui suit la méthode PERT que nous allons également utilisée dans notre étude.

## 2.4. LA METHODE PERT

Le graphique PERT [Haran, 1995] est une technique de gestion de projet qui permet de visualiser la dépendance des tâches et de procéder à leur ordonnancement ; c'est un outil de planification. Le terme PERT est l'acronyme de program (ou project) evaluation and review technique, ce qui signifie « technique d'évaluation et d'examen de programmes » ou « de projets », ou encore « Technique d'élaboration et de mise à jour de programme ».

On utilise un graphe de dépendances. Pour chaque tâche, on indique une date de début (au plus tôt), une date de fin (au plus tard), et la date la plus probable. Le diagramme permet de déterminer le chemin critique qui conditionne la durée minimale du projet.

Le but est de trouver la meilleure organisation possible pour qu'un projet soit terminé dans les meilleurs délais, et d'identifier les tâches critiques, c'est-à-dire les tâches qui ne doivent souffrir d'aucun retard sous peine de retarder l'ensemble du projet.

Cette méthode d'organisation est sans doute l'une des plus exigeantes en rigueur mais aussi l'une des plus puissantes ; c'est grâce à cette méthode qu'il a été possible de construire en 2 ans seulement une machine aussi gigantesque que le transatlantique « Queen Mary 2 »

### 2.4.1. MISE EN ÉQUATION

La méthode PERT utilise une distribution de probabilité de type BÊTA pour calculer la date de fin des tâches. La date de fin des tâches ( $\mu$ ) est calculée en utilisant les trois temps mentionnés plus haut, l'équation est la suivante :

$$\mu = \frac{A+4 \times B+C}{6} \quad (3)$$

Avec A = date au plus tôt, B = date plus probable, C = date au plus tard.

La variance est calculée de la façon suivante :

$$\vartheta = \frac{(C-A)^2}{6^2} \quad (4)$$

### 3. SYSTÈME ETUDIÉ

---

Pour notre modèle d'aide à la gestion de risques nous avons repris les travaux de [Faisal I. Khan, 2003] et nous avons défini quatre étapes clefs que seront traitées et définies dans les sections suivantes. Ces étapes se succèdent et un processus de rebouclage permet de faire un retour d'expérience en continu donc un management de risques. Ces étapes sont les suivantes.

#### **Analyse du système**

Dans cette première étape une analyse du système est faite afin de comprendre son fonctionnement et d'identifier quels sont les composants élémentaires, et parmi eux les composants critiques qui devront être évalués et surveillés.

#### **Estimation des risques**

Cette étape consiste en l'identification des modes de défaillance des pièces critiques, trouvées dans l'étape antérieure, à l'aide d'une fiche AMDEC. Ces modes de défaillances sont quantifiés par rapport à leur détection, gravité, et occurrence de façon à pouvoir calculer la criticité du mode de défaillance et la pièce associée.

#### **Évaluation des risques**

Dans cette étape nous reprenons les valeurs définies dans l'étape antérieure pour calculer la criticité de chaque mode de défaillance, pour cela nous utilisons un modèle basé sur la logique floue et la méthode PERT.

#### **Planification de la maintenance**

Lors de l'identification de la criticité des modes de défaillance, il faut agir sur les modes et pièces critiques en vue de diminuer leur criticité jusqu'à une valeur normale. Le moyen de réduction de la criticité est le développement et l'application des plans et activités de maintenance. Dans cette étape nous utilisons une fiche de gestion de risques qui nous permet de définir ces tâches facilement. Quand ces actions sont mises en place une nouvelle estimation du risque est faite.

Notre système d'aide au management des risques est décrit dans la figure 4.

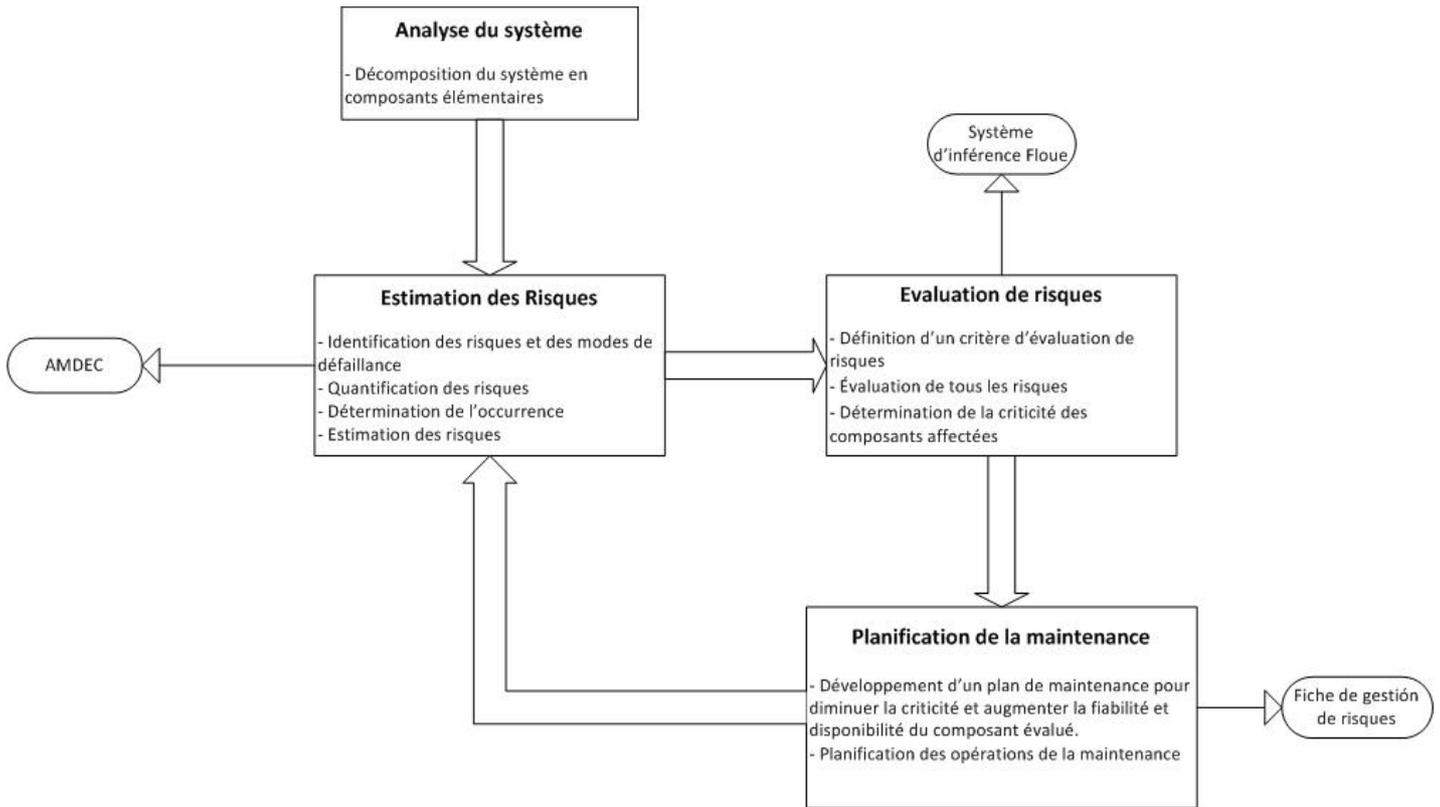


Figure 4. Ordre d'exécution des étapes

### 3.1 ANALYSE DU SYSTÈME

Le groupe générateur est composé de différents sous-systèmes, parmi eux les plus critiques et complexes sont la turbine (qui réalise la conversion de l'énergie hydraulique en énergie mécanique) et le générateur (qui réalise la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique). Dans notre étude, nous nous sommes intéressés à la turbine Francis car elle est affectée par des phénomènes difficilement modélisables (comme la cavitation, l'usure, les fuites, etc. – voir le rapport bibliographique lié à cette étude-). Pour mieux comprendre ces phénomènes, nous nous sommes intéressés à leurs effets sur les différents composants de la turbine, et nous avons également évalué les indicateurs à utiliser pour mesurer les risques liés à ces phénomènes. La turbine Francis (figure 5) constitue le cœur de notre centrale hydroélectrique, elle est très complexe et dans le cadre d'un stage de 5 mois nous avons dû la décomposer en éléments plus simples et parmi ces différents éléments nous nous sommes limités à dix composants de la turbine Francis.

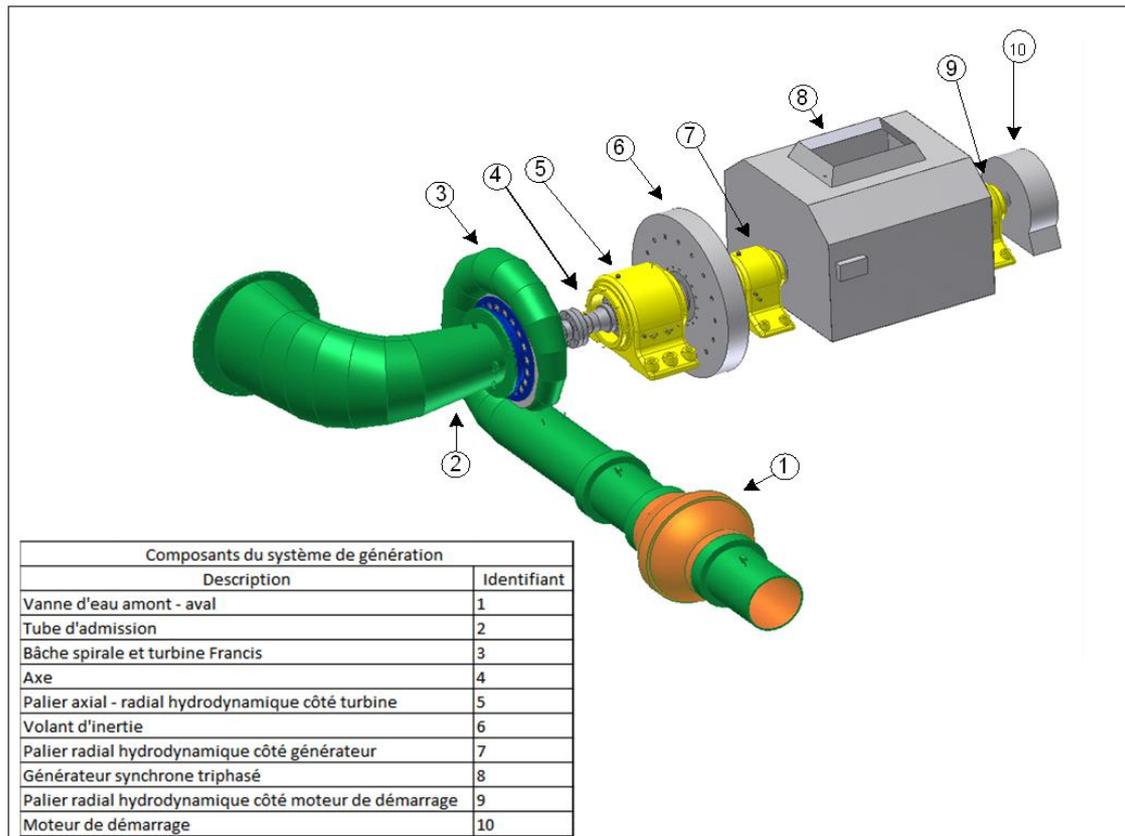


Figure 5. Ensemble de la turbine Francis

Ces dix pièces élémentaires sont données dans le tableau 1 suivant.

COMPOSANT
Roue
Bâche spirale
Aubes fixes
Alètes directrices
Jointes d'étanchéité
Tube d'admission
Tube de décharge
Arbre
Paliers hydrodynamiques
Accouplement

Tableau 1. Composants élémentaires de la Turbine Francis

Parmi ces composants nous nous sommes plus particulièrement intéressés aux éléments touchés par le phénomène de dégradation du à l'eau sableuse. L'eau qui circule dans l'ensemble, et qui amène une grande quantité de poussière, peut occasionner des pannes très graves qui peuvent compromettre la production régulière d'énergie. La détection de ces types de pannes est très difficile à mettre en œuvre, d'une part car il est très coûteux et parfois impossible de mettre en place des capteurs sur chaque élément critique et d'autre part il

n'existe à l'heure actuelle aucune méthode de diagnostic qui assure de prendre en compte l'interaction des différents composants les uns avec les autres et de remonter des informations fiables sur les pannes de la turbine Francis.

C'est pourquoi, nous avons dans un premier temps réalisé une étude particulière de certaines pièces qui nous a permis d'établir les modes de défaillances de ces composants et un outil pour déterminer leur criticité. Ces éléments sont présentés dans le tableau 2.

COMPOSANT
Roue
Tube d'admission
Alètes directrices
Jointes d'étanchéité
Tube d'admission
Tube de décharge
Alètes mobiles

Tableau 2. Composants sélectionnés pour la Turbine Francis

### 3.2. ESTIMATION DES RISQUES

Pour l'estimation des risques nous nous sommes servis de la méthode AMDEC, présentée dans la première partie de ce rapport. Nous avons pu définir les modes de défaillance des dix composants élémentaires définis précédemment. La figure 6 montre les modes de défaillance potentiels identifiés par composant.

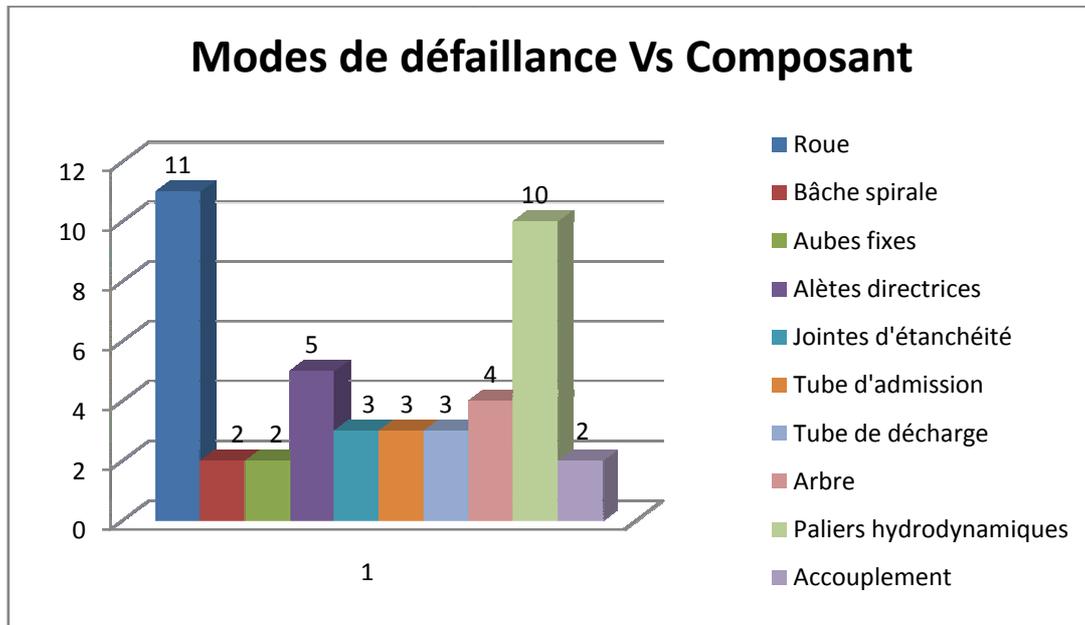


Figure 6. Modes de défaillance par composant

Le détail de ces modes de défaillance est présenté dans l'annexe 3 dans lequel vous trouverez la fiche AMDEC que nous avons construite, ces modes de défaillance sont liés à diverses causes possibles, présentées dans la figure suivante.

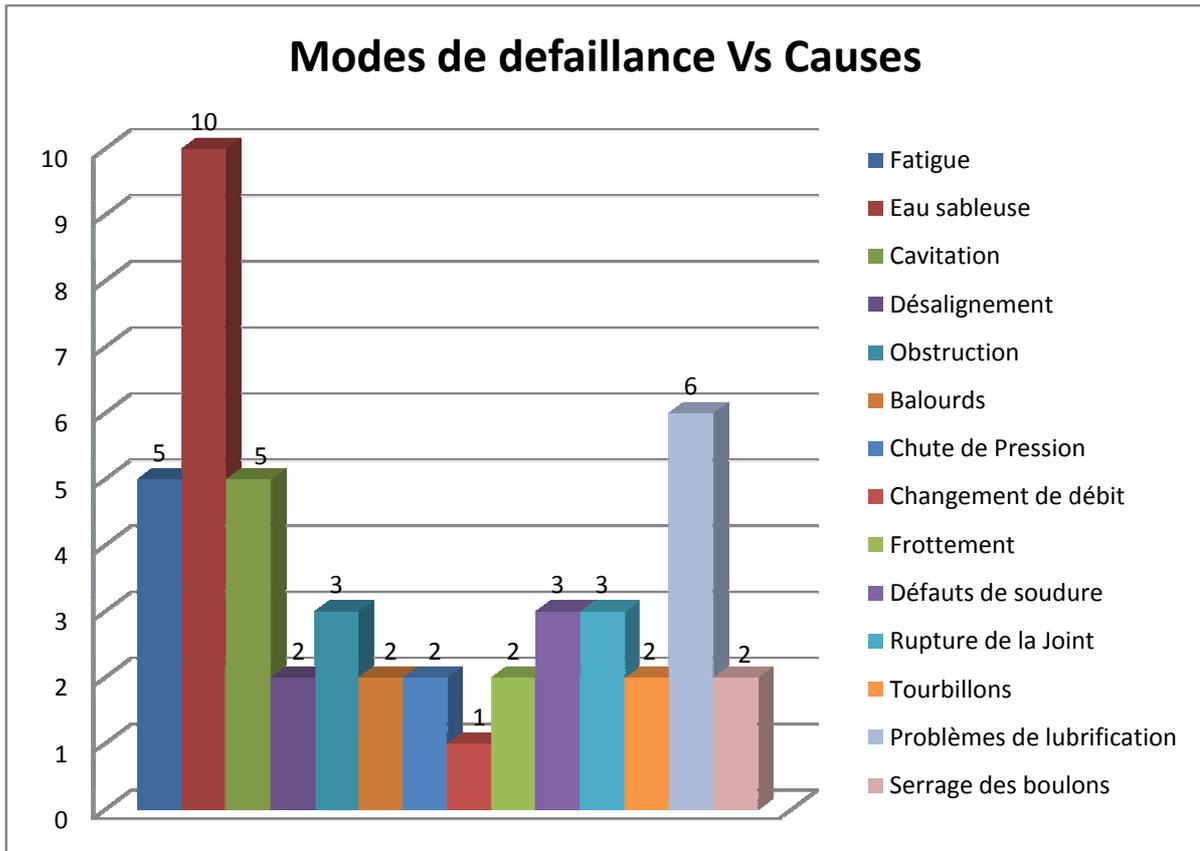


Figure 7. Modes de défaillance par cause

Les défaillances les plus récurrentes sont celles dues à l'eau sableuse, cette cause est très difficile à détecter car nous ne disposons pas d'un historique de la concentration de poussière dans l'eau pour le relier avec les pannes, et essayer de définir un modèle prédictif. D'un autre côté, la mise en place d'un système de surveillance de cette variable peut être très coûteuse et complexe, c'est pour cela que nous nous sommes intéressés à cette cause, pour essayer de construire un système capable de déterminer la criticité des composants affectés par ce phénomène.

Comme nous l'avons vu dans le deuxième chapitre de ce rapport, pour mettre en place la méthode AMDEC il faut utiliser trois variables pour déterminer la criticité de chaque composant, pour cela il faut d'abord définir des intervalles d'appartenance pour quantifier l'occurrence, la gravité et la détection.

### 3.2.1. DÉTECTION

La détection est définie comme la capacité de voir ou repérer des changements sur le système surveillé. Pour la mettre en place il faut utiliser une instrumentation spécialisée et souvent chère et complexe (voir capteurs sur l'étude bibliographique liée à ce rapport). Parfois, les machines sont équipées de capteurs et systèmes de surveillance limités et c'est là que pour nous se présente l'incertitude pour certaines pannes qui ne sont pas détectables et qui peuvent éventuellement compromettre le fonctionnement du système.

Pour quantifier la détection nous avons donc créé un tableau qui permet de traduire la perception de cette détection sur un composant spécifique (voir le tableau 3).

Valeur	Détection	Description
10	Absolument indétectable	Le système ne peut pas détecter la cause de défaillance
9	Très difficile	Il est très difficile de détecter la cause de défaillance pour le système
8	Difficile	il est difficile de détecter la cause de défaillance pour le système
7	Très peu de chance	Très peu de chances pour le système de détecter la cause de défaillance
6	Peu	Peu de chances pour le système de détecter la cause de défaillance
5	Modérée	Chance modérée pour le système de détecter la cause
4	Modérée-forte	Chance modérée-forte pour le système de détecter la cause de défaillance
3	Forte	Forte chance pour le système de détecter la cause
2	très forte	Très forte chance pour le système de détecter la cause de défaillance
1	Presque certain	Le système peut détecter une cause de défaillance potentielle

Tableau 3. Valeurs AMDEC pour la variable détection

### 3.2.2. OCCURRENCE

De la même façon que la détection, l'occurrence doit être définie en termes de « valeurs AMDEC ». Nous avons défini les valeurs dans le tableau 4 par rapport à l'apparition de la défaillance sur les heures d'utilisation de la machine après une « remise à zéro ».

Valeur	Occurrence	Description
10	Très Haute : l'apparition est presque inévitable	1 sur 168 heures
9		1 sur 252 heures
8	Haute : apparition récurrente	1 sur 672 heures
7		1 sur 1344 heures
6	Modérée : Panne occasionnelle	1 sur 2352 heures
5		1 sur 4380 heures
4		1 sur 5376 heures
3	Faible : apparition rare de la panne	1 sur 6048 heures
2		1 sur 7392 heures
1	Presque nulle : Panne presque inexistante	1 sur 8760 heures

Tableau 4. Valeurs AMDEC pour la variable Occurrence

### 3.2.3. GRAVITE

La troisième variable à considérer est la gravité, pour cela nous avons défini les valeurs suivantes. Pour les définir nous avons pris en compte les effets de la panne sur le système en général.

Valeur	Gravite	Description
10	Dangereuse sans préavis	Très haute gravité la panne compromet l'opération du système et met en danger les autres équipements et personnes. Le système ne fait pas un préavis, la panne est imminente
9	Dangereuse avec préavis	Très haute gravité la panne compromet l'opération du système et met en danger les autres équipements et personnes. Le système fait un préavis
8	Très Haute	Le système tombe en panne généralisée avec une destruction partielle, mais sans compromettre la sécurité
7	Haute	Le système tombe en panne généralisée avec endommagement de la machine
6	Modérée	Le système tombe en panne généralisée avec dommages mineures
5	Faible	Le système tombe en panne généralisée sans dommage
4	Très Faible	Le système peut fonctionner mais avec une dégradation significative de la performance
3	Insignifiant	Le système peut fonctionner mais avec un peu de dégradation de la performance
2	Très insignifiant	Le système peut fonctionner avec une interférence minimale
1	Nulle	sans effet

Tableau 5. Valeurs AMDEC pour la variable Gravite

### 3.2.4. CRITICITÉ

Celle-ci est la variable qui fait l'intérêt de notre étude elle doit être aussi définie en termes de « valeurs AMDEC », ces valeurs sont présentées dans le tableau 6. Pour calculer la criticité nous pouvons utiliser l'équation 1 ou utiliser notre modèle issu de la logique floue, comme présenté dans la section suivante.

Valeur	Criticité
10	Très Haute
9	
8	Haute
7	
6	Modérée
5	
4	
3	Faible
2	
1	Presque nulle

Tableau 6. Valeurs AMDEC pour la variable criticité

### 3.3. EVALUATION DES RISQUES

Pour l'évaluation de risques nous avons utilisé la logique floue pour créer un système d'inférence qui prend en compte toute la connaissance des experts et du personnel de maintenance qui maîtrisent bien le fonctionnement et diagnostic de la turbine. A partir de ces connaissances, nous avons créé une base de règles qui permet de calculer la criticité des risques potentiels tout en réduisant les effets de l'incertitude sur l'évaluation des variables AMDEC (occurrence, gravité et détection) car il est difficile de cataloguer un événement selon les valeurs AMDEC présentées dans la section antérieure.

Grâce aux études faites pour le groupe GEMI à l'Université EAFIT et à l'information fournie par EPM, nous avons pu construire deux modèles pour déterminer la criticité, un modèle pour toutes les pannes répertoriées avec un ou plusieurs moyens de détection et un autre modèle pour les pannes dues à des phénomènes indétectables (eau sableuse), ces modèles sont présentés dans la suite.

#### 3.3.1. MODÈLE A TROIS VARIABLES AMDEC

Pour construire ce modèle nous avons pris en compte les trois variables AMDEC pour estimer la criticité, et dans la suite nous allons décrire comme nous avons défini les différentes étapes du processus d'inférence montré dans la figure 11.

Dans la logique floue nous avons deux types de règles, type Mamdani et type Takagi-Sugeno. La différence est simple, dans une règle Mamdani la conclusion est un ensemble flou ; dans une règle Takagi-Sugeno la conclusion est une fonction généralement linéaire des entrées. Les règles que nous avons défini dans nos modèles ont été du type Mamdani car ce modèle ne nécessite pas de connaissance exacte du système.

#### Fuzzification

Comme nous l'avons présenté dans l'annexe 2, d'abord il faut fuzzifier les variables d'entrée et de sortie. Pour ces variables nous avons défini cinq ensembles flous. Le choix du nombre d'ensembles flous nous assure d'avoir une bonne précision du modèle proposé tout en limitant tout de même le nombre de règles associées. Ces ensembles sont présentés dans la suite.

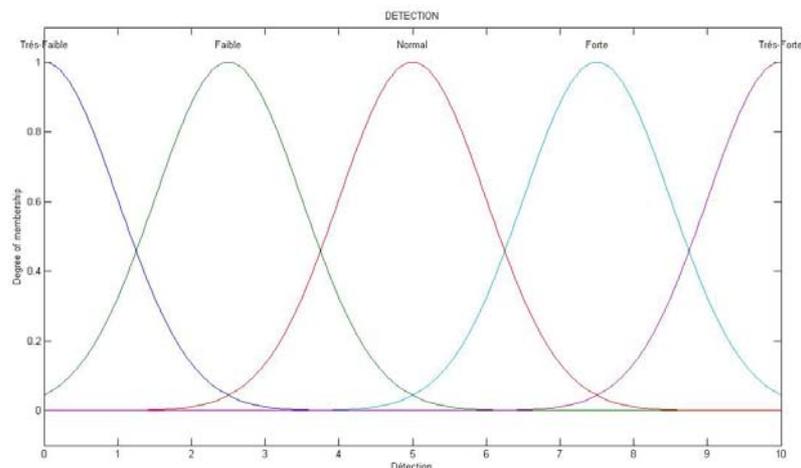


Figure 8. Fuzzification de la variable Détection.

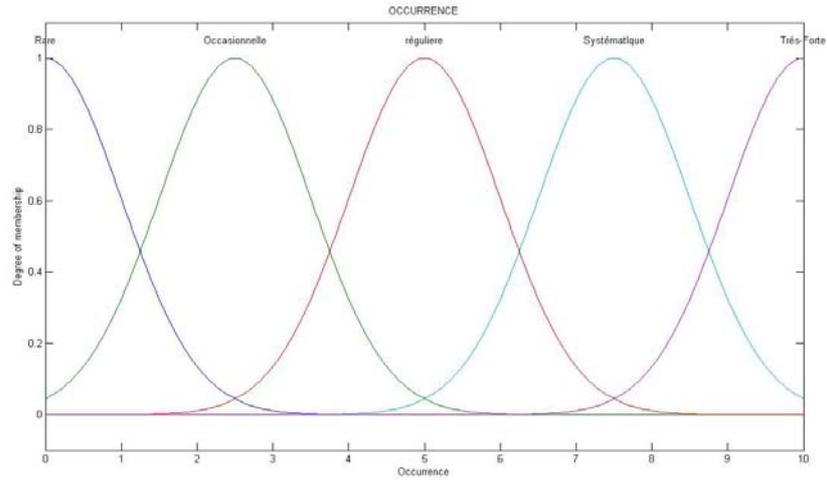


Figure 9. Fuzzification de la variable Occurrence.

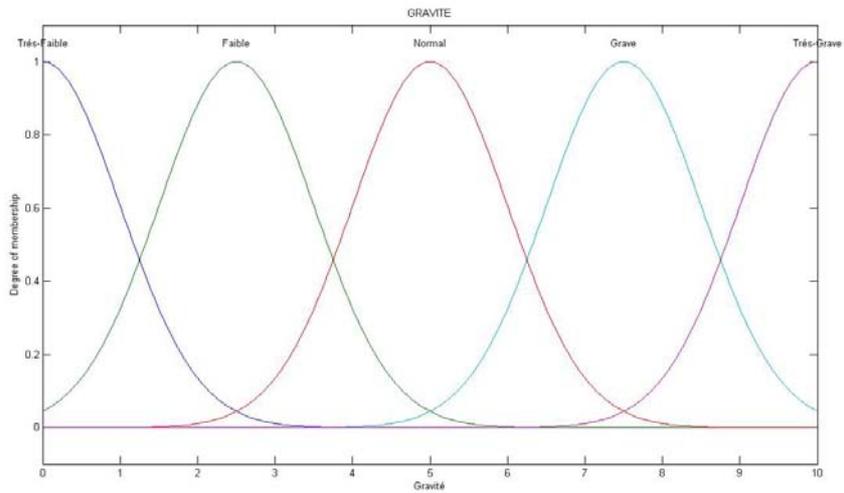


Figure 10. Fuzzification de la variable Gravité.

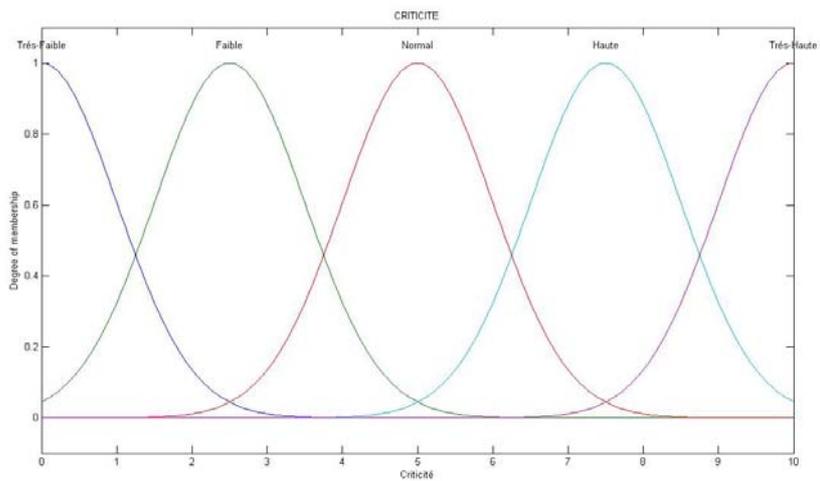


Figure 11. Fuzzification de la variable criticité.

Dans ces graphiques nous apprécions qu'une valeur d'entrée «x» peut appartenir au moins à un ensemble et au maximum à trois ensembles. Ce degré d'appartenance partielle nous permet de gérer l'incertitude. Nous avons choisi la forme d'une cloche pour définir les ensembles car nous considérons que la courbe de gauss nous permet d'intégrer l'aspect probabiliste des variables. Le choix final de la forme des ensembles flous ne pourra se faire et être validé qu'à partir du retour des experts sur le diagnostic de la turbine Francis.

## Base de règles

Après la définition des ensembles pour les variables d'entrée l'étape suivante est la définition des règles ou lois de comportement de notre système. C'est dans cette partie que la connaissance intervient pour définir nos règles. L'avantage de la logique floue est que toutes ces lois ne sont pas des équations compliquées ou énoncés complexes, les règles en logique floue sont des énoncés sémantiques ou verbaux faciles à définir et à comprendre.

Malheureusement, à la date de début de ce stage et jusqu'à présent, l'EAFIT n'a pas terminé l'étude de la turbine Francis et par conséquent n'a pas pu nous communiquer suffisamment d'information. Par conséquent, nous avons défini nos règles selon le bon sens et sans pour l'instant être sûrs de la véracité de chacune de ces règles.

Le nombre total de règles que nous devons définir est donné selon l'équation suivante (équation 5) :

$$K = C^v \quad (5),$$

avec K = Nombre de combinaisons, C = Nombre de valeurs possibles à prendre, V = nombre de variables.

Donc,

$$K = 5^3$$
$$K = 125$$

Soit cent et vingt-cinq cas possibles à évaluer pour déterminer la criticité d'un mode de défaillance et d'un composant critique.

Nous avons proposé alors deux modèles différents, le premier étant la transcription des 125 règles possibles et dans l'autre modèle nous avons réduit la totalité des cas possibles à 53 règles élémentaires, les résultats de ces modèles sont présentés dans la section de résultats de ce rapport et le détail des modèles est donné en Annexe 4.

## Défuzzification

Traditionnellement la méthode la plus utilisée lors de la défuzzification est celle du centre de gravité, car cette formule permet de calculer la valeur la plus représentative de l'ensemble de sortie résultant. Cette méthode prend en compte la totalité des ensembles de sortie comme nous l'avons vu dans le chapitre 2. Pour le modèle que nous proposons, nous avons réfléchi à l'intégration de la gestion des risques avec la maintenance sur la base d'une AMDEC et pour gérer l'incertitude des différentes variables nous proposons une nouvelle méthodologie.

Ainsi, pour défuzzifier, dans notre modèle nous proposons une méthode basée sur la méthode PERT utilisée en gestion de projets, car elle permet d'intégrer les notions au plus juste, au plus tard et valeur moyenne ou attendue. Cette méthode nous semble intéressante car elle permet

de mieux gérer l'incertitude que les méthodes proposées jusqu'à présent (voir section 2.3.1).

Ainsi, dans notre méthode nous prenons en compte la valeur la plus optimiste de la criticité, la valeur la plus pessimiste et la valeur la plus probable de la criticité. Ces valeurs nous les calculons de la façon suivante :

- La valeur la plus optimiste est la plus petite valeur de la criticité où la valeur de la fonction d'appartenance est maximale, voir figure 22.
- La valeur la plus pessimiste est la plus grande valeur de la criticité où la valeur de la fonction d'appartenance est maximale, voir figure 22.
- La valeur la plus probable est la valeur du centre de gravité, voir figure 22.

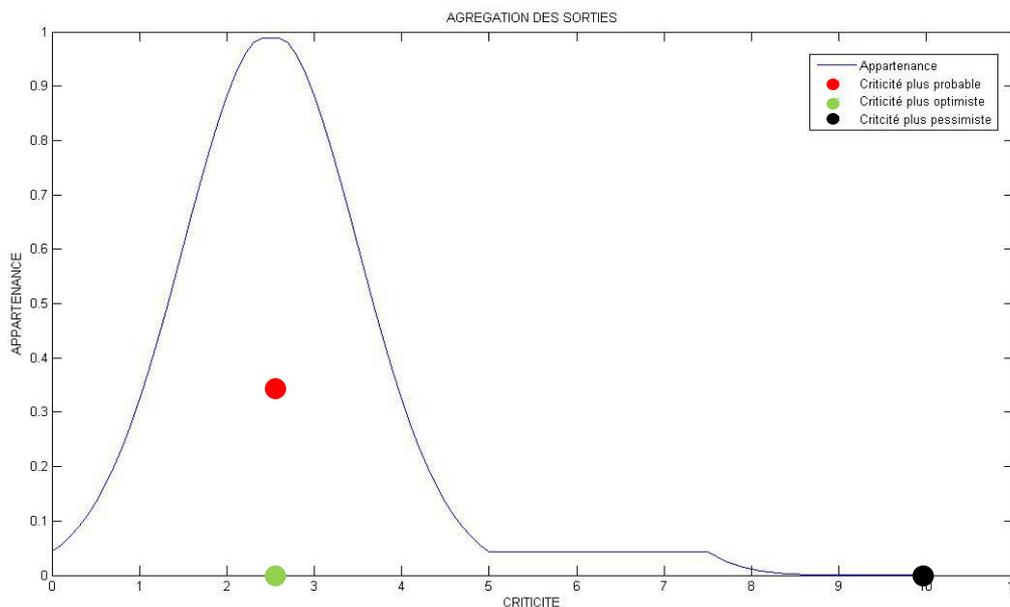


Figure 12. Processus d'inférence global

Nous avons pu déterminer la criticité avec l'aide de ces valeurs et l'équation 3. Ce modèle n'est qu'une proposition et le fait d'intégrer l'aspect PERT sur le calcul de la sortie devrait sans doute être retravaillé en fonction de la théorie des ensembles, mais par manque de temps nous n'avons pu le faire.

Remarque : pour le calcul de la surface résultante nous avons utilisé un outil d'optimisation selon les points obtenus. Cet outil est présenté en Annexe 4.

### 3.3.2. MODÈLE A DEUX VARIABLES AMDEC

Le modèle à deux variables est un cas particulière du modèle à trois variables. Nous avons créé ce modèle pour permettre de calculer la criticité des pannes non détectables comme les pannes liées à l'eau sableuse et à la cavitation. Dans ce modèle, nous avons seulement comme entrées l'occurrence et la gravité pour déterminer la criticité.

Cette modification a un impact direct sur la quantité de règles à définir, la nouvelle quantité de cas possibles à évaluer est égale à (voir équation 5) :

$$K = 5^2$$

$$K = 25$$

Pour ce modèle nous n'avons évidemment pas fait une réduction de nombre de règles sauf pour le cas particulier de la gravité car de même que pour le modèle à trois variables une gravité Très-Grave entraîne une criticité Très-Haute.

Les règles pour ce modèle sont présentées dans l'annexe 3, le fonctionnement du mécanisme d'inférence et d'optimisation est le même que précédemment. L'algorithme d'optimisation reste invariant pour ce modèle.

### 3.4. PLANIFICATION DE LA MAINTENANCE

Pour diminuer les pannes sur les différents composants, il faut prévoir et mettre en place des actions adaptées et sur mesure pour chaque composant et mode de défaillance et ce selon sa criticité. C'est pour cela que nous nous sommes centrés d'abord sur la détermination de la criticité. Lorsque l'on connaît les composants critiques nous pouvons agir directement sur ces composants pour augmenter la fiabilité du système et diminuer les probabilités d'un arrêt.

Pour faciliter cette démarche nous disposons pour le modèle à trois variables de la fiche AMDEC présentée dans la section 3.2 (annexe 3). cette fiche est composée de trois sections, la première destinée à la détermination de la criticité à l'aide de notre modèle flou, la deuxième à la création des actions de maintenance pour la réduction de la criticité et l'augmentation de la fiabilité et une dernière étape qui permet de faire une évaluation de la nouvelle criticité après la mise en place des actions de maintenance, la figure suivante nous montre l'ordre d'exécution de ces tâches.

PRÉVU/EXISTANT					ACTIONS				RÉSULTATS					
Détection	1	Notes			C	Responsable	2	Mesures prises	Notes			3	Temps échange	Livret points critiques
		D	O	G					D'	O'	G'			

Figure 13. Gestion des risques AMDEC

Cette fiche va permettre au personnel de maintenance et aux chercheurs et ingénieurs du laboratoire GEMI de créer et gérer les actions liées aux modes défaillance qui comptent avec un moyen de détection, mais à ce moment là une question apparait, comment est-ce que nous allons gérer les risques liés aux phénomènes indétectables ?

Pour répondre à cette question nous nous sommes inspirés de la fiche AMDEC et de l'étude des risques. Nous avons donc créé une nouvelle fiche qui est présentée dans l'annexe 6 qui permet de calculer la criticité de la pièce et du mode de défaillance en se servant du modèle flou à deux variables (la détection n'est plus prise en compte). L'ordre d'exécution est le suivant.

Gravité	Occurrence	Criticité	Cause	Prévention	Réparation
1 - 10	0.1 - 1	1	2	3	4

Figure 14. Gestion des risques à deux variables

Ces fiches ont été créées pour les mettre à disposition des dépanneurs et chercheurs, car ce sont eux qui maîtrisent bien le fonctionnement du système et peuvent donc définir les actions adéquates pour traiter les risques identifiés.

Pour évaluer sa pertinence et son efficacité nous avons rempli une fiche pour évaluer les modes de défaillance dues à une cause indétectable, plus particulièrement nous avons traité les pannes dues à l'eau sableuse qui cause aujourd'hui de grands problèmes pour ces turbines comme nous l'avons vue dans la première section de ce rapport. La fiche est présentée dans l'annexe xx. A l'aide de cette fiche et de notre modèle flou nous avons pu déterminer la criticité de chaque mode de défaillance indétectable associé à l'eau sableuse par les experts, ces résultats sont présentés dans le graphique suivant.

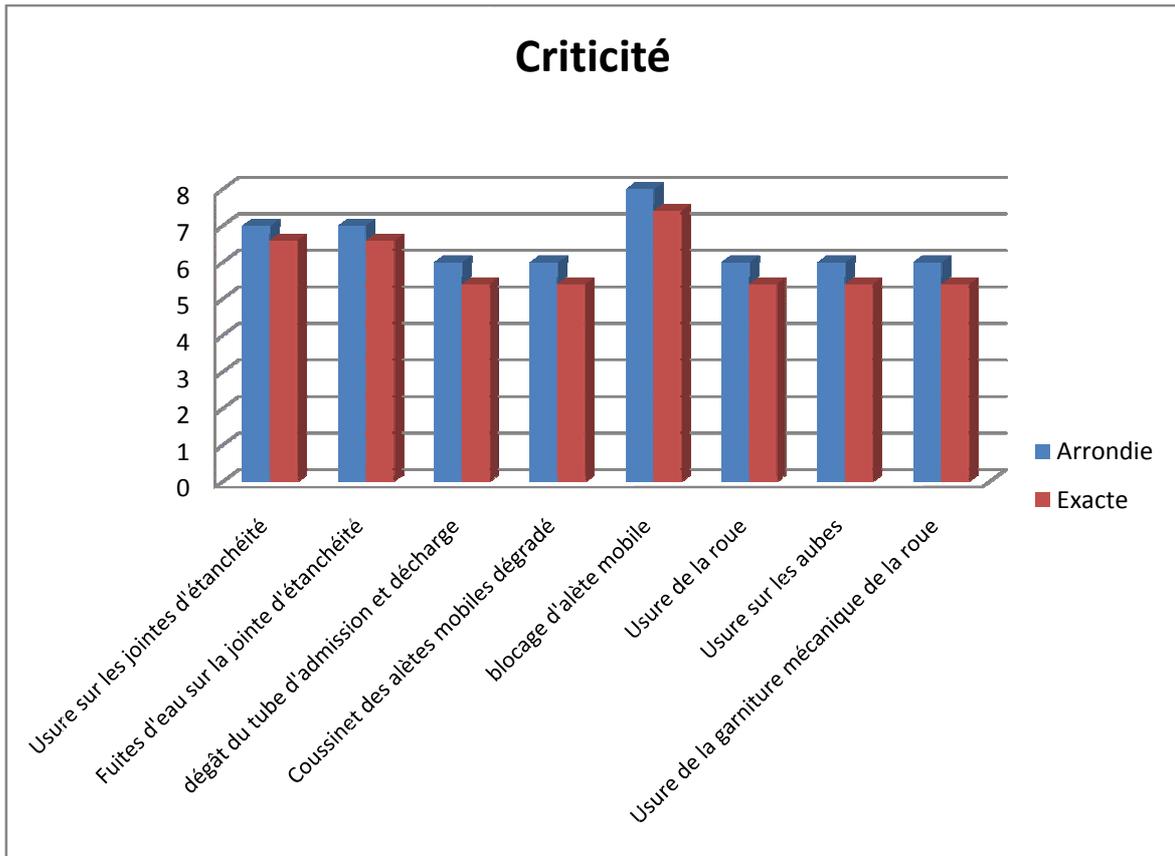


Figure 15. Criticité des modes de défaillance liés à l'eau sableuse

Pour cette cause nous avons identifié huit modes de défaillance potentiels, le mode de défaillance le plus critique est le blocage de l'ailette mobile. Il est tout à fait évident que cette panne est la plus critique car l'apparition de cette défaillance implique un arrêt de la production d'énergie, et pour remplacer cette pièce située à l'intérieur du système, il est nécessaire de démonter la turbine totalement. Grâce aux actions préventives proposées dans la fiche nous pourrions augmenter la disponibilité de la machine en agissant préventivement sur ce composant de façon à diminuer l'intervalle d'apparition de cette panne (occurrence) et faire basculer la criticité jusqu'à un niveau normal.

Nous pouvons donc dire que les pannes dues à l'eau sableuse sont en moyenne hautes en terme de criticité, donc c'est un des phénomènes sur lequel il faudra mettre en place des dispositifs spécifiques ou chercher de nouvelles technologies pour en diminuer les effets.

Cette méthode de planification de la maintenance nous permet de couvrir les causes les plus critiques qui peuvent mettre en danger le fonctionnement correct de notre turbine, d'agir sur elles et ainsi diminuer les conséquences au maximum.

Lorsque les actions ont été définies et mises en places, il faut recalculer les variables AMDEC et déterminer la nouvelle criticité et vérifier que la valeur est bien en dessous de la criticité acceptable. Si ce n'est pas le cas et que la criticité reste encore trop significative il faudra définir des actions plus efficaces et faire encore une fois le retour d'expérience.

C'est un processus en boucle fermée qui permet d'optimiser les actions de la maintenance sur le système.

### 3.5. CONCLUSIONS PARTIELLES

La décomposition du système en composants élémentaires se présente comme une technique simple et validée pour l'identification de pièces à surveiller sur la turbine. Il est plus facile de penser aux modes de défaillance pour chaque sous-système et pièces que de penser aux modes de défaillance pour le système en général, car il est possible qu'une panne du système soit causée par l'apparition de pannes sur les différents sous-systèmes et composants.

L'évaluation des risques en utilisant la logique floue est une méthode qui permet de générer des conclusions sur la criticité. L'avantage de cette méthode est qu'elle peut être utilisée par n'importe quel utilisateur (dépanneur, technique) n'ayant pas forcément une très bonne expertise technique. Notre modèle doit cependant être encore amélioré soit par une étape d'apprentissage (neurones flous) ou à l'aide du retour des experts pour faire une modification sur la base des règles.

La méthode AMDEC et la fiche de gestion de risques à deux variables, permettent de développer des méthodes de maintenance préventives sur mesure et adaptées à chaque mode de défaillance non détectables.

## 4. RESULTATS

Pour créer nos modèles flous nous avons utilisé le module de Fuzzylogic compris dans le logiciel Matlab<sup>®</sup>, car ce module nous a permis de définir de façon simple tous les paramètres de nos modèles.

Dans nos modèles nous avons laissé constants les paramètres suivants :

- Les fonctions d'appartenance pour les variables d'entrée et sortie selon les figures 8, 9, 10 et 11.
- L'opération « et » et l'implication qu'utilisent l'opérateur minimum, l'opération « ou » et l'agrégation qui se servent de l'opérateur maximum.
- Pour la défuzzification nous avons utilisée la méthode PERT.

### 4.1. MODÈLE À TROIS VARIABLES

Pour le modèle a trois variables nous avons évalué deux cas, le cas à 53 règles et le cas à 125 règles, nous vous exposons les résultats de chaque modèle dans ce qui suit.

#### 4.1.1. MODÈLE A 53 RÈGLES

Dans la suite nous présentons les surfaces obtenues pour ce type de modèle.

Remarque : Comme nous avons trois variables d'entrées, pour la visualisation en 3D, nous avons fixé une des trois variables toujours à la valeur 5 dans chacune des figures suivantes.

La première surface que nous présentons est celle de la criticité en fonction de la détection et de l'occurrence (avec une gravité de 5) (voir figure 16).

Cette surface présente un comportement par paliers et certaines zones qui fait que le résultat ne soit pas le meilleur comportement possible pour notre démarche. On peut noter que dans ce modèle la détection n'a presque pas d'importance si l'occurrence est entre zéro et trois, de même lorsque l'occurrence est maximale la criticité devrait tendre à augmenter.

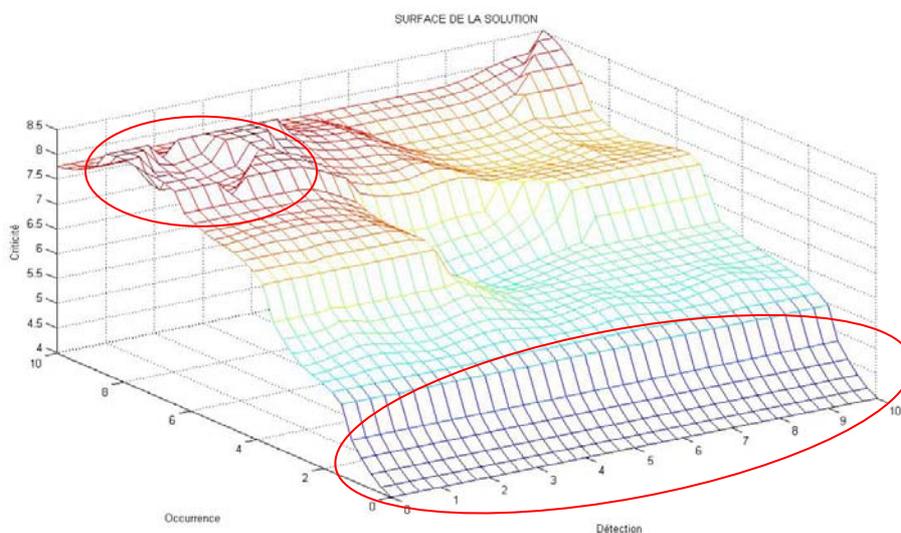


Figure 16. Occurrence vs Détection vs Criticité pour le modèle à 53 règles

Un modèle bien défini doit être symétrique par rapport à la diagonale principale, car l'ordre des termes ne modifie pas le résultat, voir figure 17.

Détection	Gravité	Occurrence	Criticité
A	B	C	$\frac{A \times B \times C}{3}$
B	A	C	$\frac{B \times A \times C}{3}$

Figure 17. Symétrie de la criticité

Nous pouvons noter les mêmes problèmes pour les 2 autres surfaces (voir figures 32 et 33).

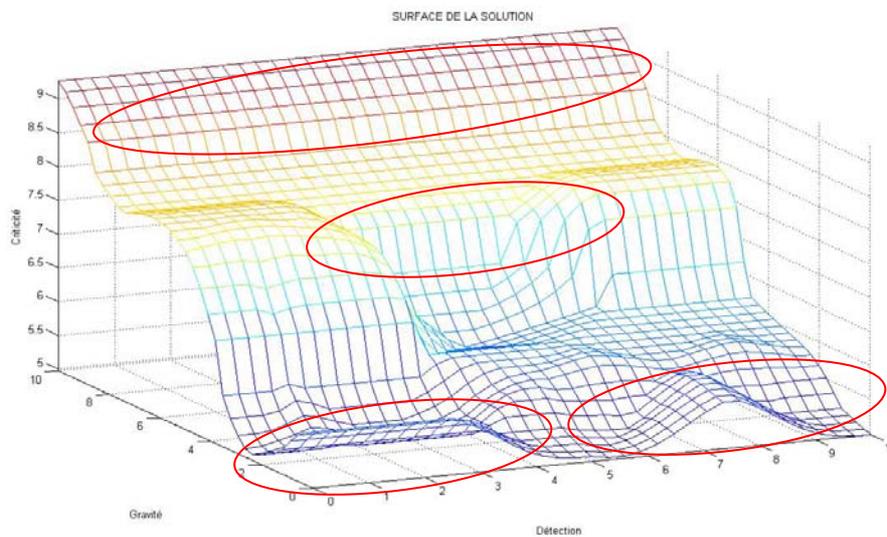


Figure 18. Gravité vs Détection vs Criticité pour le modèle à 53 règles

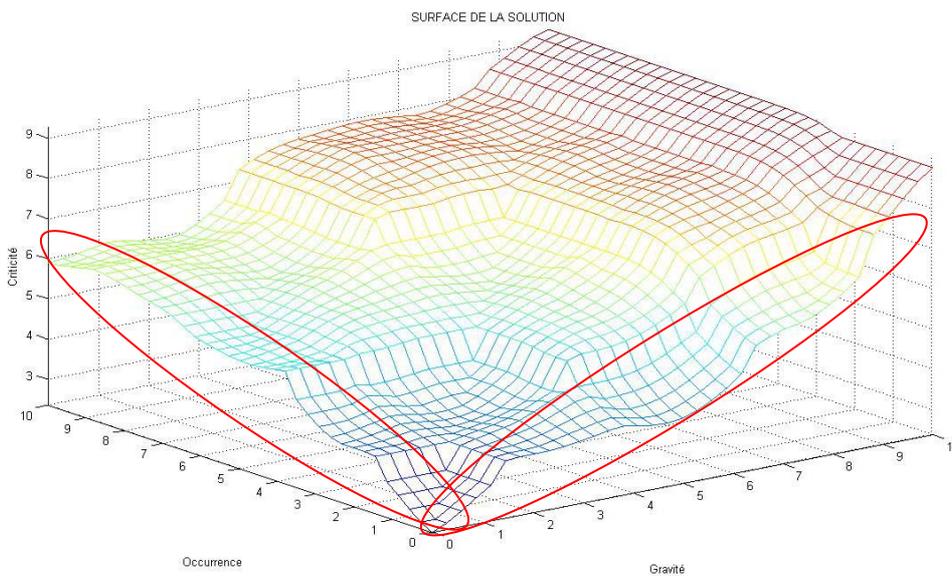


Figure 19. Gravité vs Détection vs Criticité pour le modèle à 53 règles

Ce comportement s'explique essentiellement par la réduction des règles, car nous ne pouvons plus garantir le respect de la symétrie. Nous avons changé à plusieurs reprises ces règles pour voir si nous pouvions trouver des surfaces plus cohérentes mais malgré nos efforts les résultats obtenus n'ont rien donné d'intéressant (voir l'annexe 7). Il est à noter que la réduction des règles ne peut se faire et être valable que lorsque nous aurons un retour de l'étude des données fournies par les différents capteurs. En effet, la notion de symétrie que nous avons voulu conserver n'est peut être pas la surface la plus cohérente pour la turbine Francis.

#### 4.1.2. MODÈLE A 125 RÈGLES

Pour ce modèle, nous avons construit une règle par cas tout en respectant la condition de symétrie (voir l'annexe 8). Ce modèle nous a donné les surfaces suivantes.

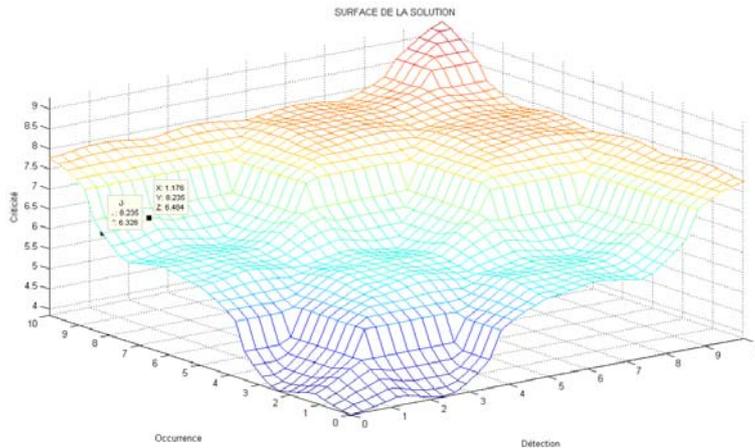


Figure 20. Occurrence vs Détection vs Criticité pour le modèle à 125 règles

Nous pouvons noter que dans ce modèle la symétrie est parfaitement respectée, la seule irrégularité que nous trouvons sont des crêtes comme celles qui sont repérées sur la figure 20. Ces crêtes sont dues à la méthode de défuzzification (méthode PERT). En effet, dans cette méthode nous prenons trois valeurs, or la valeur la plus optimiste et le centre de gravité sont dans la même zone (voir figure 20) mais la valeur la plus pessimiste est loin de ces deux dernières, ce qui peut avoir une incidence sur la valeur finale. Cette incidence est en faite relativement petite (par exemple de 0.156 unités pour notre figure), donc un changement presque nul.

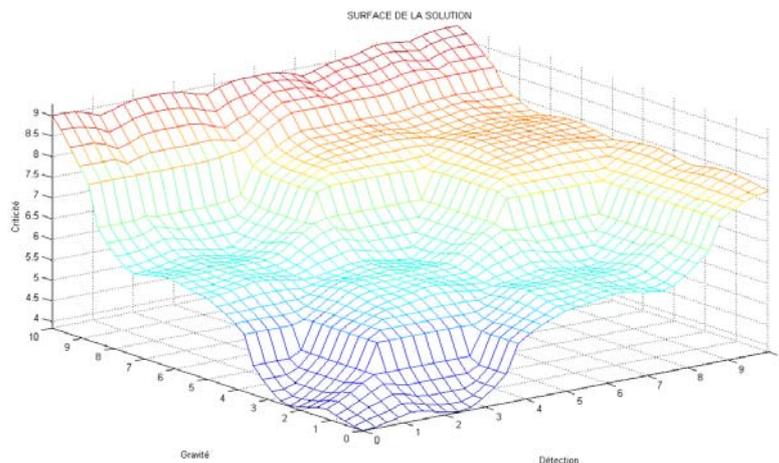


Figure 21. Gravité vs Détection vs Criticité pour le modèle à 125 règles

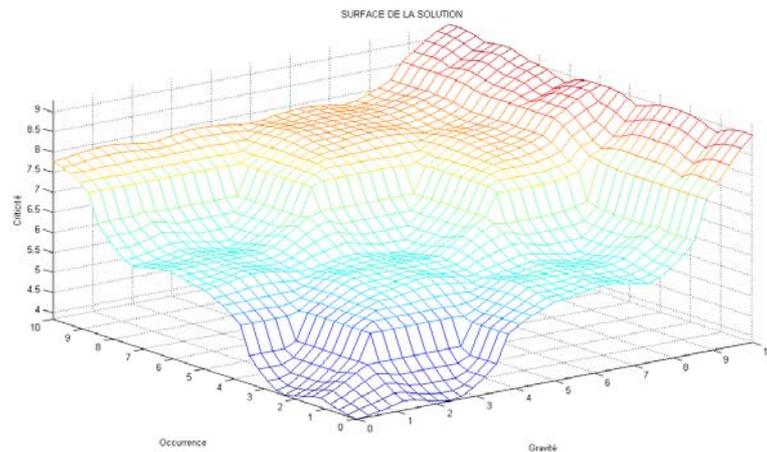


Figure 22. Occurrence vs Gravité vs Criticité pour le modèle à 125 règles

Le modèle proposé représente bien ce que nous attendons, mais il reste à travailler sur l'application de la méthode PERT à des ensembles non-classiques pour adoucir un peu la surface et réduire au maximum l'influence des crêtes.

#### 4.1.3. CHOIX DU MODÈLE

Le meilleur modèle est donc le modèle complet à 125 règles :

- Le modèle respecte clairement la condition de symétrie
- Les surfaces sont presque régulières et les changements dus aux irrégularités sont insignifiants.
- Le modèle permet d'évaluer la criticité sans connaissance particulière des variables d'entrée.

#### 4.2. MODÈLE À DEUX VARIABLES

Pour ce modèle nous n'avons pas fait de réduction des règles car les cas à évaluer étaient gérables (25 cas possibles) et de plus nous pouvons garantir les conditions de symétrie. Nous avons donc défini les règles présentées dans l'annexe 10 et nous avons obtenu la surface suivante.

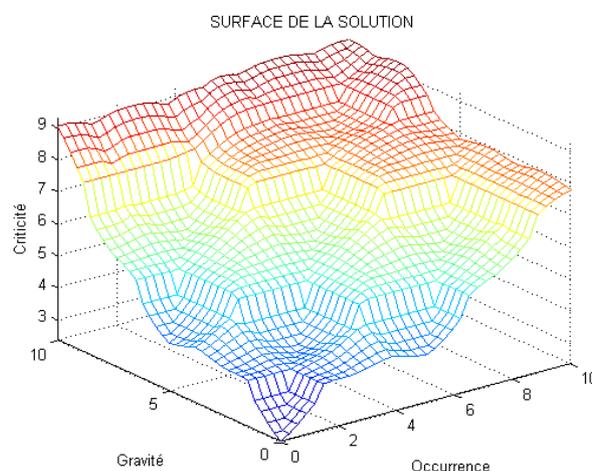


Figure 23. Occurrence vs Gravité vs Criticité pour le modèle à 25 règles

Ce modèle à été immédiatement validé car il respecte pleinement les critères que nous avons utilisés pour valider le modèle à 125 règles. L'optimisation du modèle à 125 règles et le modèle à 25 règles sont présentées dans l'annexe 5.

### 4.3. UNE AUTRE MÉTHODE DE DÉFUZZIFICATION

Pour voir si notre méthode de défuzzification était logique nous l'avons comparée avec la méthode de défuzzification la plus utilisée (c'est à dire le centre de gravité), les surfaces que nous avons trouvées pour cette méthode son présentées dans le tableau suivant.

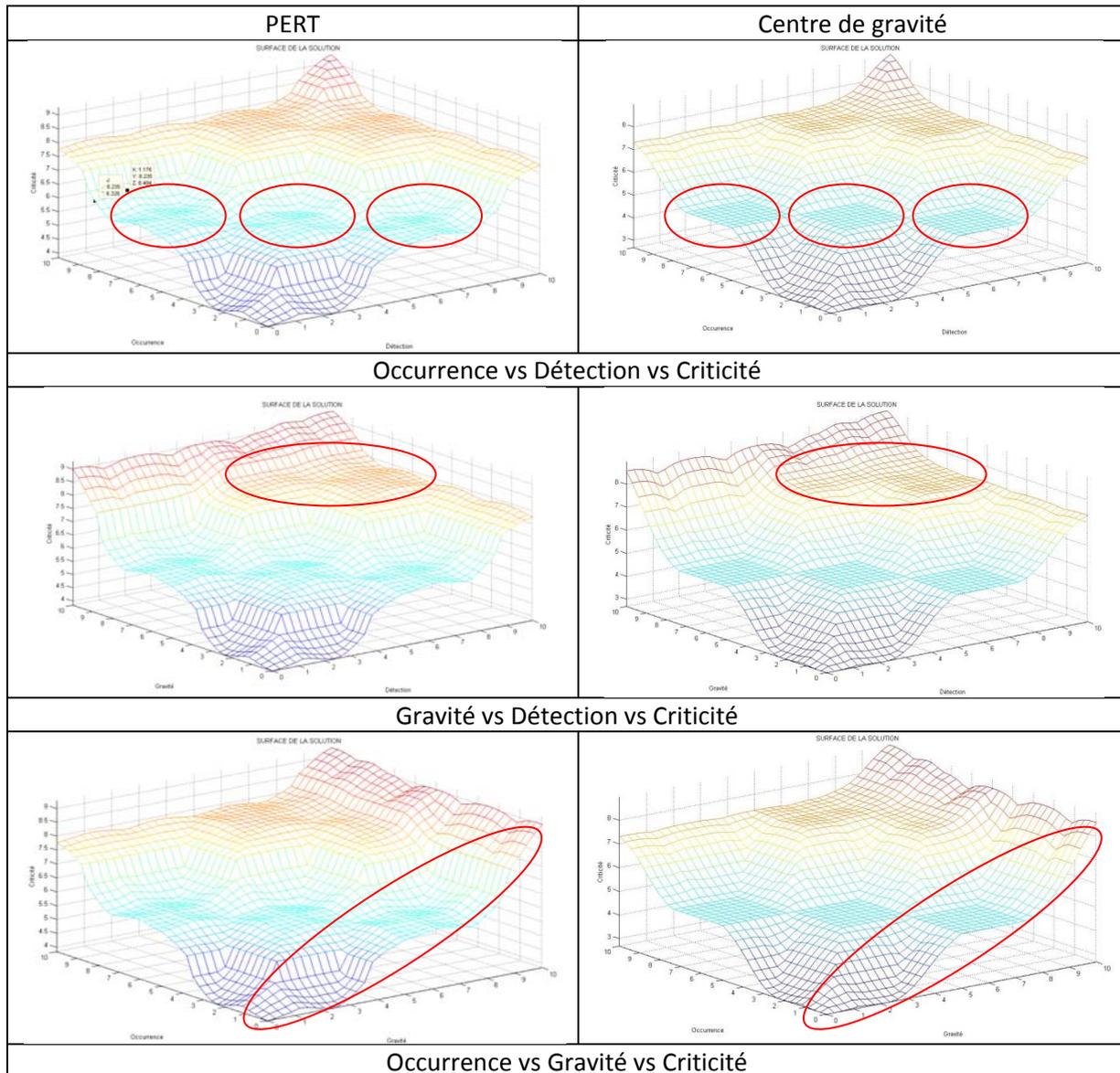


Tableau 6. Comparaison entre la méthode de défuzzification de Type PERT et de Type centre de gravité.

A partir de cette comparaison nous pouvons remarquer que la méthode de défuzzification basée sur le PERT que nous proposons se rapproche des résultats de la méthode traditionnelle, mais avec l'avantage que la méthode PERT prend en compte plus de valeurs et a donc une plage d'étude plus importante que le centre de gravité. Ces résultats permettent de donner

une meilleure transition pour gérer l'incertitude. Nous pouvons voir que dans les zones indiquées dans le tableau 6, la transition est beaucoup plus douce dans les surfaces défuzzifiées utilisant la méthode PERT mais bien sur cela entraîne des crêtes comme nous avons pu le constater précédemment. Les résultats obtenus via la méthode PERT nous semble donc très intéressants et devront être corrigés en fonction du retour de l'expertise de l'EAFIT. Il faudra recorriger les règles et les adapter en fonction du système étudié.

## 5. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

---

Nous avons défini un outil d'aide à la décision pour la définition de plans de maintenance en intégrant la notion de risques. La difficulté majeure en gestion des risques est bien sur comme nous l'avons vu la quantification des risques les uns par rapport aux autres, quantification essentielle pour assurer que les actions de maintenance mises en place assure à la fois la disponibilité du système mais également assure la sécurité de l'ensemble. Les risques étant généralement exprimés en terme de connaissance humaine, il nous a semblé très intéressant d'utiliser la logique floue pour résoudre ce problème. Le travail mené nous a permis de constater que la logique floue se présente comme une méthode très prometteuse. De plus, elle peut aussi bien s'appliquer dans le cas de défaillances détectables (grâce à des capteurs) ou dans un cadre plus difficile à estimer lorsque les défaillances ne sont pas détectables. Ce dernier cas de figure étant très important pour le système industriel étudié car la mise en place de capteurs et l'expertise de ces capteurs est d'une part très chère et d'autre part demande du temps et des ressources. L'intégration d'outils issus de l'intelligence artificielle permettra donc de créer des relais qui pourront être placés dans tous les sites de production de l'entreprise EPM pour aider le personnel à prendre de bonnes décisions lors de la maintenance, tout en limitant les coûts.

De plus, la méthode que nous avons proposée, se basant sur une décomposition du système en sous-systèmes et pièces élémentaires associée à l'AMDEC pour l'identification des pièces et modes de défaillance critiques, nous a permis de bien connaître le fonctionnement et le comportement du système et ainsi mettre en évidence les composants clés à traiter en priorité (grande thématique de recherche actuellement au laboratoire GEMI de l'EAFIT). Nous avons pu découvrir si la totalité des causes étudiées étaient bien surveillées et instrumentées. Le grand apport de notre travail se situe au niveau de l'utilisation de la méthode PERT comme une technique possible de défuzzification. Les résultats obtenus sont très intéressants et promoteurs. Cette méthode devrait être exploitée dans le futur et associée aux retours des experts de l'EAFIT pour corriger les défauts actuels.

Les règles floues que nous avons proposées sont basées sur le sens commun car nous n'avons pu récupérer le retour d'information de l'EAFIT qui n'a toujours pas terminé son expertise de la turbine Francis ni de l'analyse complète des informations fournies par les capteurs actuellement en place. C'est pourquoi, notre modèle est un système ouvert qui peut et doit être modifié en fonction du retour des chercheurs et ingénieurs du laboratoire GEMI et de l'entreprise EPM en supprimant ou en ajoutant de nouvelles règles. Le fait d'avoir utilisé le module Fuzzylogic de Matlab rend notre système très « sympathique » et facile à comprendre, il peut donc être rééquilibré et redéfini rapidement pour faire face à de nouveaux phénomènes ou de nouvelles conditions de fonctionnement qui peuvent apparaître lors d'un changement des conditions environnementales ou de la mise en place de nouveaux capteurs.

Nous sommes fiers d'avoir proposé un outil innovant pour la maintenance se basant sur l'évaluation des risques pour un système technique complexe mais essentiel à l'économie du pays et ne nécessitant pas un apport financier important. Il est bien sur évident que notre outil ne sera pas utilisé pour la maintenance de systèmes très coûteux comme les satellites mais il reste très porteur pour de nombreux systèmes et pour de nombreux pays... L'autre intérêt de notre démarche est de proposer un modèle ne nécessitant pas la définition de modèles physiques complexes qui sont parfois inexacts (à cause des différentes suppositions émises) et difficiles à définir. De la même façon nous avons pu créer une méthode de gestion de risques performante qui du fait du rebouclage permet de faire une évaluation en continu des risques

pour redéfinir des opérations plus adaptées et performantes et ainsi augmenter la disponibilité et fiabiliser la production en énergie.

Pour améliorer notre système, nous envisageons différents chemins et modifications à étudier, ces possibilités sont les suivantes :

1. Utilisation de la méthode PERT ou une méthode similaire pour la création des nouveaux opérateurs dans le processus d'inférence. Par exemple la méthode PERT pourrait être utilisée lors de l'étape d'agrégation dans le processus d'inférence, dans cette étape on pourrait identifier les règles ou les entrées dont le degré d'appartenance selon les « poids PERT » et les intégrer dans le calcul de la défuzzification. Nous avons commencé à travailler sur ce principe mais cela demande de réécrire complètement le système flou car le module fourni par Matlab ne permet pas ce genre de modifications [voir annexe 4].

Dans cette même idée, il faut également réfléchir à la définition des valeurs de la criticité la plus optimiste et la plus pessimiste et ce selon la théorie des ensembles non classiques, car on pourrait trouver des valeurs plus représentatives que celles que nous avons utilisées.

2. Mettre en place un système d'apprentissage neuro-flou pour permettre au modèle de se rééquilibrer automatiquement et de s'adapter aux petits changements sur les informations transmises par les capteurs.
3. Lorsque l'étude du laboratoire GEMI sera finie, une étape d'étude statistique pour trouver la meilleure forme pour définir les ensembles flous liés aux variables d'entrée et sortie pourrait améliorer significativement la précision de notre modèle. Si l'étude statistique n'est pas pertinente nous pourrions utiliser des ensembles flous de Type-2 [MENDEL, 2007] pour améliorer la gestion de l'incertitude.
4. Les règles floues doivent également être retravaillées et adaptées en fonction des résultats fournies par l'EAFIT.
5. L'étude doit être généralisée à l'ensemble des composants de la turbine Francis.

Cette expérience a été très intéressante pour moi, car elle m'a permis de me mettre dans la peau d'un chercheur et de développer les différentes qualités nécessaires pour mener à bien un projet de recherches. En effet, le projet dans lequel j'ai participé se situe pleinement dans les nouvelles tendances de recherche en maintenance, et je suis content d'avoir pu apporter ma contribution à la fois sur l'intégration de la gestion des risques en maintenance mais également sur le principe de fonctionnement de la logique floue. Ces travaux seront d'ailleurs soumis pour publication à une revue. De plus, grâce au modèle que j'ai proposé nous pouvons commencer à fiabiliser l'alimentation en énergie dans une région touchée actuellement par des coupures d'électricité.

De façon plus personnelle, ce projet m'a permis de découvrir la recherche et m'a donné envie de continuer en thèse de Doctorat pour ensuite travailler dans un laboratoire de R&D d'une entreprise.

## 6. BIBLIOGRAPHIE

---

- [1.] **Arango G., Hennequin S. y Rezg N.** Fuzzy modeling and optimization of imperfect maintenance [Conférence] // IESM'07. - Pekin : [s.n.], 2007.
- [2.] **evariste** Les technologies clés [En ligne] // Maintenance des grands systèmes . - 1996. - 2008. - <http://admi.net/evariste/100tc/1996/f098.html>.
- [3.] **Faisal I. Khan Mahmoud M. Haddara** Risk-based maintenance (RBM): a quantitative approach for maintenance/inspection scheduling and planning [Publication de journal] // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. - [s.l.] : ELSEIVER Sciences, 2003. - Vol. 16.
- [4.] **Garin Hervé** AMDEC, AMDE, AEEL : l'essentiel de la méthode [Livre]. - Paris : AFNOR, 1994 .
- [5.] **Gomez R. Fernandez, Hennequin S. y Rezg N.** Decision Making based on Fuzzy Logic for Products Subcontracting taking into account maintenance actions [Conférence] // 3rd annual IEEE Conference on Automation Science and Engineering. - Arizona : [s.n.], 2007.
- [6.] **GUARNIZO GOMEZ Luisa Fernanda** CONCEPTOS BÁSICOS PARA UN DIAGNÓSTICO TÉCNICO EN UNA [Livre]. - MEDELLIN : EAFIT, 2007.
- [7.] **Haran Guillaume** Méthode PERT : gestion et ordonnancement de projets par la méthode du chemin critique [Livre]. - Paris : Eyrolles, 1995 .
- [8.] **Hennequin S., Arango G. y Rezg N.** Optimization of imperfect maintenance based on fuzzy logic [Publication de journal] // Quality in Maintenance Engineering. - under correction.
- [9.] **Xu K. L.C. Tang, M. Xie, S.L. Ho, M.L. Shu** Fuzzy assessment of FMEA for engine systems [Publication de journal] // Reliability Engineering and System Safety. - [s.l.] : ELSEVIER Science, 2002. - 75.
- [10.] **Empresas Publicas de Medellin** La Herradura [En ligne]. - 2006. - 2007. - <http://www.eppm.com/epmcom/contenido/acercade/infraestructura/generacion/Centraleshidroelectricas/centrallaherradura.htm>.
- [11.] **MENDEL Jerry M.** Type-2 Fuzzy sets and systems: an overview [Publication de journal] // IEEE COMPUTATIONAL INTELLIGENCE MAGAZINE. - February de 2007.
- [12.] **REPUBLICA PRESIDENCIA DE LA SNE** [En ligne]. - 2006. - 2007. - [http://www.presidencia.gov.co/prensa\\_new/sne/2004/octubre/26/04262004.htm](http://www.presidencia.gov.co/prensa_new/sne/2004/octubre/26/04262004.htm).
- [13.] **Ruiz. Oscar E.** Understanding CAD / CAM / CG [Livre]. - [s.l.] : ASME, 2002.
- [14.] **VARLET Henri** Turbines hydrauliques et groupes hydroélectriques [Livre]. - Paris v : Eyrolles, 1964. - Vol. I.
- [15.] **Ying-Ming Wang, Kwai-Sang Chin, Gary Ka Kwai Poon, Jian-Bo Yang** Risk evaluation in failure mode and effects analysis using fuzzy [Publication de journal] // Expert Systems with Applications. - 2008. - ARTICLE IN PRESS.
- [16.] **Zadeh LA** Fuzzy Sets [Livre]. - 1965. - Vol. vol.8 : págs. 338-353.

## 7. ANNEXES

---

ANNEXE 1 .....	41
ANNEXE 2 .....	45
ANNEXE 3 .....	49
ANNEXE 4 .....	56
ANNEXE 5 .....	61
ANNEXE 6 .....	70
ANNEXE 7 .....	72
ANNEXE 8 .....	80
ANNEXE 9 .....	90
ANNEXE 10 .....	95

**ANNEXE 1**

**TURBINE FRANCIS**

La turbine constitue le cœur de l'installation hydroélectrique, puisque le type de turbine utilisé déterminera l'aménagement de l'ensemble de l'installation. La conception hydraulique d'une turbine est déterminée par le débit de l'eau ainsi que sa hauteur de chute. La turbine doit aussi tourner à une vitesse conforme à la vitesse d'un alternateur. La conception des turbines se divise en trois catégories.

- Type centrifuge: les turbines Francis
- Type axial: les turbines à hélice ou à pas variable (Kaplan, Deriaz)
- Type à impulsion: les turbines Pelton

Selon [VARLET, 1964], il est d'usage de considérer les turbines Pelton comme des turbines à action et les autres turbines (Francis, hélice, Kaplan, Deriaz) comme des turbines à réactions.

Les turbines à action sont préférentiellement utilisées sur des cours d'eau ayant une chute d'eau (énergie potentielle de l'eau) supérieure à 60 mètres. Elles peuvent générer de l'énergie avec des hauteurs d'eau importantes voir même phénoménales. Elles transforment l'énergie cinétique d'un jet d'eau à très haute vitesse et la transmettent à une turbine. Dans cette famille, nous trouvons entre autres la turbine Pelton.

La seconde famille est celle des turbines à réaction, c'est-à-dire les turbines qui combinent la puissance cinétique de l'écoulement du fluide et l'apport de la pression pour les transformer en énergie mécanique et par la suite, en énergie électrique. Ce type de turbine est généralement utilisé dans les endroits où le débit d'eau est prépondérant sur la chute (inférieure à 50 mètres avec des débits importants). Les turbines faisant partie de cette catégorie sont : les turbines Francis, à écoulement radial et les turbines Kaplan ou hélices, à écoulement axial. Les turbines à hélices sont une spécialité nord-américaine.

### **Turbines Francis**

Ce système proposé par le Français Jean Poncelet à la fin des années 1820, fut breveté par le Nord-américain Samuel B. Howd en 1838 et popularisé par James Bichens Francis.

La turbine Francis (*Figure 3*) est une machine à réaction, ce qui signifie que la pression à l'entrée de la roue est supérieure à la pression de sortie de la roue. Dans ce sens, elle utilise à la fois la réaction et l'impulsion.

La partie réaction représente la partie où la pression statique du fluide est transmise à la roue alors que la partie impulsion correspond à la partie où l'énergie cinétique du fluide est transmise à la roue.



Figure 3. Turbine Francis. Source: Hydro-Québec

Les turbines Francis sont utilisées pour des chutes moyennes et peuvent développer des puissances très importantes.

Dans la turbine Francis (Figure 4), l'eau sous pression entre dans une bêche spirale, de section transversale circulaire, dont la forme rappelle celle d'une coquille d'escargot ; elle enveloppe l'anneau distributeur de la turbine qui, lui-même, enveloppe la roue de la turbine.

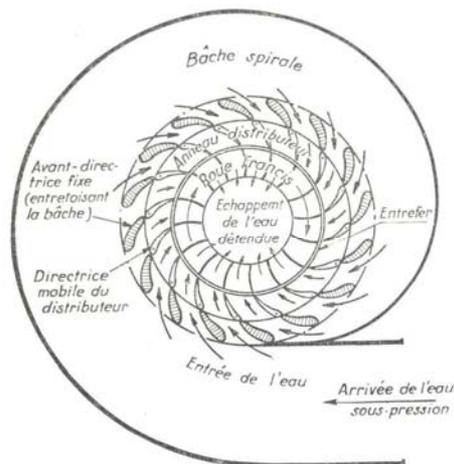


Figure 4. Turbine Francis. Source: [VARLET, 1964]

La forme de la bêche résulte du souci de réaliser une même vitesse moyenne  $V$  dans toutes ses sections, ceci afin d'éviter des changements brusques de vitesse qui engendreraient des chocs dans les écoulements. Il faut, en conséquence, que le diamètre de la section transversale de la bêche aille, progressivement, en décroissant, au fur et à mesure que le débit  $Q$  se répartit (Figure 5) sur le pourtour d'entrée du distributeur.

L'anneau de distributeur comporte deux couronnes métalliques concentriques (de diamètre extérieur  $D$ , le cercle intérieur enveloppant la roue), centrées sur l'axe de rotation de la turbine et maintenues écartées, parallèlement à cet axe, par des entretoises fixes qui servent également d'entretoises, à la bêche spirale, sur son pourtour de raccordement avec l'anneau du distributeur.

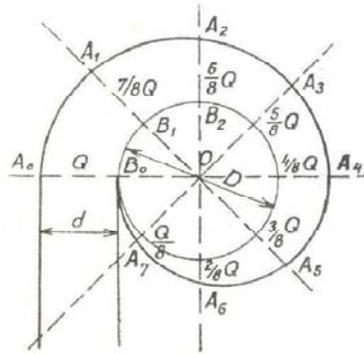


Figure 5. Répartition du débit. Source: [VARLET, 1964]

Le distributeur est muni, dans le prolongement des entretoises fixes, de directrices mobiles, d'orientation réglable qui conduisent l'eau fournie par la bêche vers la roue de la turbine. Elle pénètre dans cette dernière (Figure 6), passe entre les aubes (Voir Figure 7), s'y détend, entraîne la roue et tombe dans le canal de fuite, guidée par un tube aspirateur – diffuseur (Figure 8). [VARLET, 1964]

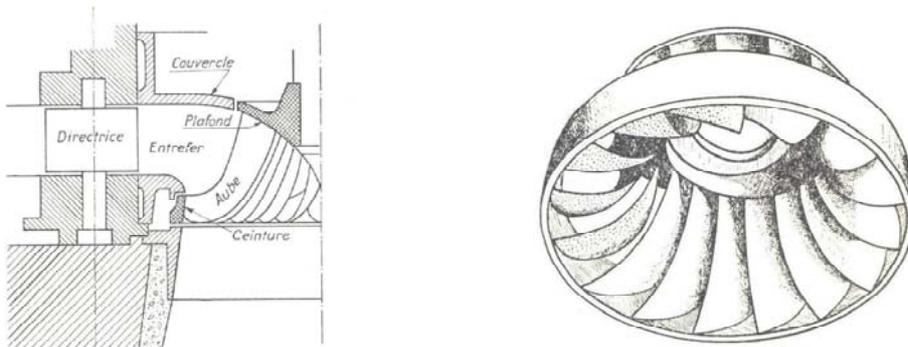


Figure 6 et 7. Section Turbine et Aubes. Source: [VARLET, 1964]

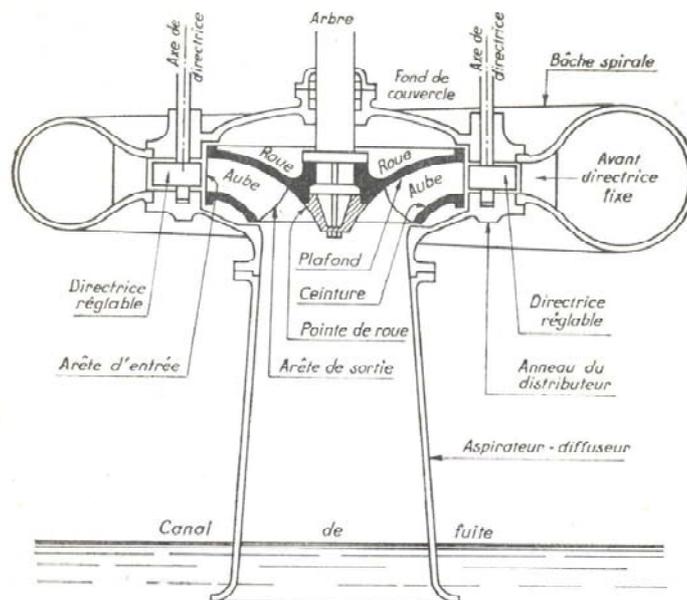


Figure 8. Installation d'une Turbine Francis. Source: [VARLET, 1964]

## LOGIQUE FLOUE

## Théorie des ensembles flous

La théorie des ensembles flous est une extension de la théorie classique des ensembles. Quand on considère la théorie classique le degré d'appartenance d'un élément par rapport à l'ensemble est évalué en termes binaires. Un élément appartient à l'ensemble ou il n'appartient pas à cet ensemble. Par contre, la théorie des ensembles flous permet l'évaluation graduelle de l'appartenance des éléments de l'ensemble. Un élément  $x$  appartient à un ensemble avec un certain degré  $\mu(x)$  compris entre 0 et 1 (Figure 1).

La fonction d'appartenance  $\mu_A(x)$  quantifie le degré d'appartenance d'un élément dans l'ensemble  $X$ .

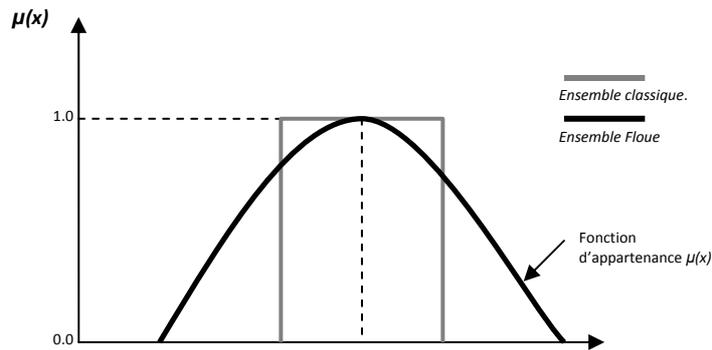


Figure 1. Fonction d'appartenance

La logique floue utilise différents outils pour caractériser et traiter des informations : des ensembles flous avec des valeurs d'appartenance comprises entre 0 et 1, des fonctions d'appartenance, etc. Le principe de fonctionnement de la logique floue est décrit en trois étapes : La fuzzification, les règles d'évaluation ou d'inférence et la défuzzification.

## Principe

Le principe de fonctionnement de la logique floue, est le suivant (Figure 2) :

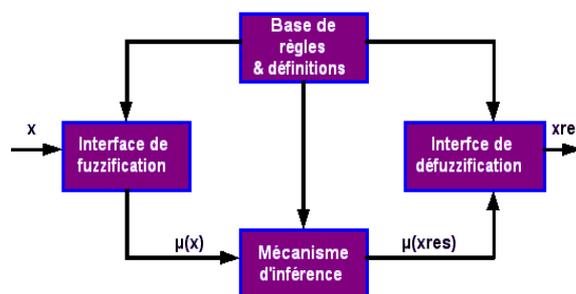


Figure 2. Processus d'inférence

1. Définition d'ensembles flous à partir d'un univers de discours. Ces ensembles flous vont nous permettre de transformer les variables d'entrées en variables floues utilisables par la logique floue. Pour cela, pour chaque variable d'entrée, on définit une fonction d'appartenance. Cette première étape est appelée **fuzzification**. C'est le processus de transformation des valeurs d'un ensemble classique (crisp) en valeurs linguistiques. Les valeurs d'entrée sont traduites en concepts linguistiques, qui sont représentées par les ensembles flous.
2. Le deuxième module consiste en l'application de règles du type «si l'écart de température est grand, alors diminuer le débit du fuel». Ces règles vont permettre de passer d'un degré d'appartenance d'une grandeur d'entrée au degré d'appartenance d'une grandeur résultante. Ce module est constitué d'une **base de règles et d'un moteur d'inférence**. « A partir de la base de règles (fournie par l'expert) et du sous ensemble flou  $X_0$  correspondant à la fuzzification du vecteur d'entrée  $x_0 = [x_{0,1}, \dots, x_{0,n}]^T$ , le mécanisme d'inférence calcule le sous-ensemble flou  $\mu(x_0)$  relatif à la sortie du système ».
3. Le troisième et dernier module décrit l'étape de défuzzification. Il permet de passer d'un degré d'appartenance d'un ensemble flou résultant en la détermination de la valeur exacte (crisp) à donner à la variable de sortie. C'est le processus inverse de la fuzzification. On a une valeur floue qui est transformée en une valeur classique (crisp). Différentes méthodes de défuzzification peuvent être utilisées, les plus connus sont :
  - A. Principe de la valeur Max : Cette méthode choisit l'élément avec la valeur d'appartenance maximale. Quand il arrive qu'ils existent différentes valeurs maximales, on prend la moyenne de ces valeurs.
  - B. Centre de gravité : La méthode de défuzzification la plus utilisée est celle de la détermination du centre de gravité de la fonction d'appartenance résultante  $\mu_{RES}(z)$ . Dans ce contexte, il suffit de calculer l'abscisse  $z^*$  (Figure 3).

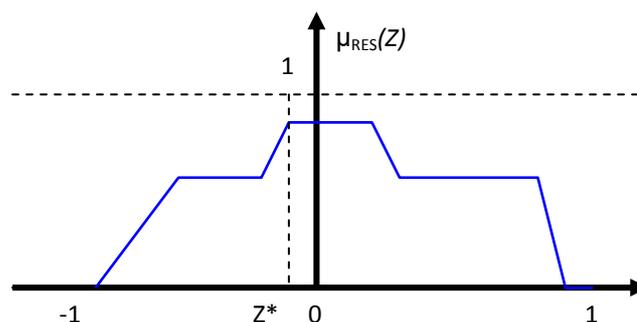


Figure 3. Defuzzification par Centre de gravité

Lorsque la fonction d'appartenance est composée par des morceaux de droites, il est possible de faire les intégrations analytiquement, avec les coordonnées  $z_j, \mu_j$  des points d'intersections des  $p$  segments de droites (Figure 4).

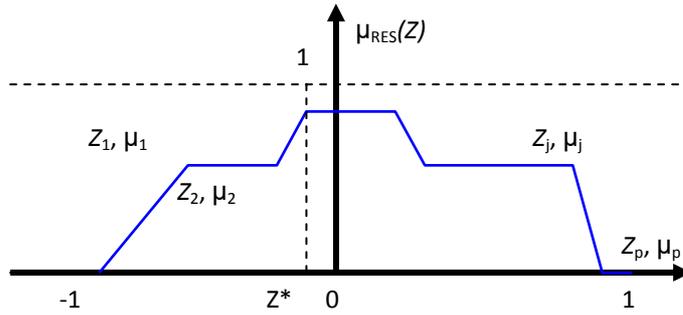


Figure 4. Défuzzification par centre de gravité.

L'abscisse du centre de gravité peut être calculée par la relation suivante :

$$z^* = \frac{\sum_{j=1}^p (z_{j+1} - z_j) [(2z_{j+1} + z_j)\mu_{j+1} + (2z_j + z_{j+1})\mu_j]}{3 \sum_{j=1}^p (z_{j+1} - z_j) (\mu_{j+1} + \mu_j)} \quad (2)$$

**ANNEXE 3**

**FICHE AMDEC POUR UN GROUPE HYDROÉLECTRIQUE  
DU TYPE FRANCIS**

**AMDEC MOYEN DE PRODUCTION**

Constructeur :

Ensemble Fonctionnel :

Date AMDEC :

PAGE

Equipement: Turbine Francis

Phase opérationnelle:

Pilote AMDEC : Diego TOBON

Composant	Répère	Mode de défaillance	Causes possibles	Effet sur l'atelier	PRÉVU/EXISTANT			ACTIONS			RÉSULTATS																																			
					Détection	Temps d'échange	Notes D O G	Responsable	Déjà	Mesures prises	Notes D O G	CR	Temps d'échange	Livret points critiques																																
Roue		Fissures sur le corp de la roue Fissures sur les aubes	Fatigue	Appel aux dépanneurs	liquide pénétrants, particules magnétiques	analyse des vibrations																																								
																Usure sur la roue	Eau sabieuse ou cavitation	Inspection visuelle ou vidéoscope																												
																												Usure sur les aubes	Eau sabieuse ou cavitation	analyse des vibrations																
																																						Usure de la garniture mécanique	Eau sabieuse ou cavitation	Mesures de la pression avec les alètes mobiles fermés						
déséquilibre hydraulique	obstruction au flux d'eau	analyse des vibrations																																												
													déséquilibre dynamique	balourds	analyse des vibrations - analyse de phase																															

**AMDEC MOYEN DE PRODUCTION**

Constructeur : Ensemble Fonctionnel :

Date AMDEC :

PAGE

Equipement: Turbine Francis

Phase opérationnelle:

Pilote AMDEC : Diego TOBON

Composant	Repère	Mode de défaillance	Causes possibles	Effet sur l'atelier	PRÉVU/EXISTANT			ACTIONS			RÉSULTATS			
					Détection	Temps d'échange	Notes	Déla	Mesures prises	Notes	CR	Temps d'échange	Livret points critiques	
Roue		Cavitation	Chute de pression		Mesure de bruit - analyse des vibrations									
		Pulsations de pression	débit différent au nominal, obstructions dans les conduits											
		frottement	frottement entre la roue et la carcasse		Analyse des vibrations									
Bâche spirale, aubes fixes		Fuites d'eau	rupture de la tuyauterie de la bâche spirale, défauts de soudure, rupture joint d'étanchéité		inspection visuelle et mesure de la pression dans la bâche spirale avec les ailettes fermées									
		vibrations de la structure	présence de tourbillons		Analyse des vibrations									
Jointes d'étanchéité		Usure	Eau sableuse ou cavitation		inspection visuelle ou utilisation du vidéoscope, analyses des particules dans l'eau à la sortie de la turbine									

**AMDEC MOYEN DE PRODUCTION**

Constructeur:

Ensemble Fonctionnel:

Date AMDEC :

PAGE

Equipement: Turbine Francis

Phase opérationnelle:

Pilote AMDEC : Diego TOBON

Composant	Repère	Mode de défaillance	Causes possibles	Effet sur l'atelier	PRÉVU/EXISTANT			ACTIONS			RÉSULTATS						
					Détection	Temps d'échange	Notes D O G	Responsable	Déjà	Mesures prises	Notes D O G	CR	Temps d'échange	Livret points critiques			
Jointes d'étanchéité		fuites d'eau	usure a cause de l'eau sableuse		mesure de la pression dans la bêche spirale avec les ailettes fermées												
						usure de la jointe fixe sur la roue	usure a cause de l'eau sableuse		mesure de la pression dans la bêche spirale avec les ailettes fermées								
Tube d'admission et décharge		vibrations de la structure	présence de tourbillons		Analyse des vibrations - mesure de bruit												
						dégât	usure a cause de l'eau sableuse ou cavitation		inspection visuelle ou utilisation du vidéoscope								
						Fuites d'eau	Défauts de soudure, usure de la joint d'étanchéité		inspection Visual ou utilisation du vidéoscope								
ailettes mobiles		perte de contrôle	fatigue et perte de la ténacité		rupture du boulon fusible												
						Fissures sur les ailettes	Fatigue		analyse des vibrations								
						blocage de l'ailette	présence de cayeux et		rupture du boulon fusible								

**AMDEC MOYEN DE PRODUCTION**

Constructeur: Ensemble Fonctionnel :

Date AMDEC :

PAGE

Equipement: Turbine Francis Phase opérationnelle:

Pilote AMDEC : Diego TOBON

Composant	Repère	Mode de défaillance	Causes possibles	Effet sur l'atelier	PRÉVU/EXISTANT			ACTIONS			RÉSULTATS											
					Détection	Temps d'échange	Notes D O G	Responsable	di	Mesures prises	Notes D O G	CR	Temps d'échange	Livret points critiques								
ailettes mobiles		fuites d'eau	usure de la joint d'étanchéité à cause de l'eau sableuse		inspection visuel																	
															coussinet dégradé	inspection visuel						
joint d'étanchéité extérieure		fuites d'eau	eau sableuse		inspection visuel																	
arbre		usure par frottement	lubrification déficiente, haute température, huile dégradé		analyse tribologique, analyse des vibrations, capteurs de température																	
		déséquilibre dynamique	flexion par frottement métal-métal, ou à cause de la montée en température des coussinets		analyse des vibrations - analyse de phase																	
			balourds		analyse des vibrations - analyse de phase																	



**AMIDEC MOYEN DE PRODUCTION**

Constructeur :

Ensemble Fonctionnel :

Date AMDEC :

PAGE

Equipement: Turbine Francis

Phase opérationnelle:

Pilote AMDEC : Diego TOBON

Composant	Repère	Mode de défaillance	Causes possibles	Effet sur l'atelier	PRÉVU/EXISTANT			ACTIONS			RÉSULTATS													
					Détection	Temps d'échange	Notes D O G	Responsable	Déla	Mesures prises	Notes D' O' G'	CR	Temps d'échange	Livret points critiques										
Palliers hydrodynamiques		fuites d'huile	excès du lubrifiant		inspection du niveau d'huile dans le réservoir																			
															serrage mauvais									
désalignement angulaire	desserrage des boulons																							
accouplement		désalignement parallèle	desserrage des boulons		analyse des vibrations - analyse de phase																			

## ANNEXE 4

# MODÈLES ET MÉCANISME D'INFÉRENCE

### Modèle à 125 règles

Pour construire le modèle à 125 règles, nous avons traité chaque cas et nous avons tiré une conclusion par cas. Pour construire ces règles, nous avons selon la grandeur des entrées défini la sortie (criticité) en conséquence. Par exemple si nous avons une détection Très-Faible, une occurrence Très-forte et une gravité grave alors la criticité doit être haute :

« **Si** (Détection est Très-Faible) et (Occurrence est Très-Forte) et (Gravité est Grave) **Alors** (Criticité est Haute) »

La seule exception dans ce modèle correspond au cas où la gravité est dans l'ensemble Très-Grave. Dans ce cas la criticité est dans l'ensemble Très-Haute, car la panne peut compromettre la sécurité. Cette règle est traduite en logique floue de la façon suivant.

« **Si** (Gravité est Très-Grave) **Alors** (Criticité est Très-Haute) »

La totalité de ces règles est donnée par :

### Modèle à 53 règles

Pour le modèle à 53 règles, nous avons concaténer nos règles pour simplifier le modèle et réduire les temps de simulation. Par exemple si nous avons une occurrence rare est une gravité grave nous définissons la criticité comme normale, car dans ce cas particulier le phénomène se produisant presque jamais (occurrence rare), la détection n'est pas un facteur important à considérer, c'est plutôt la gravité qu'il faut considérer :

« **Si** (Occurrence est Rare) et (Gravité est Grave) **Alors** (Criticité est Normal) »

### Mécanisme d'inférence

Pour le mécanisme d'inférence nous avons utilisé le minimum et maximum couramment utilisé en logique floue [Zadeh, 1965].

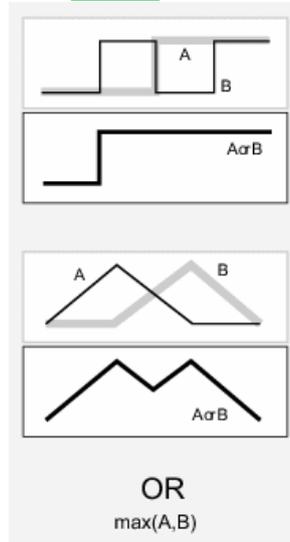


Figure 1. Operateur maximum.

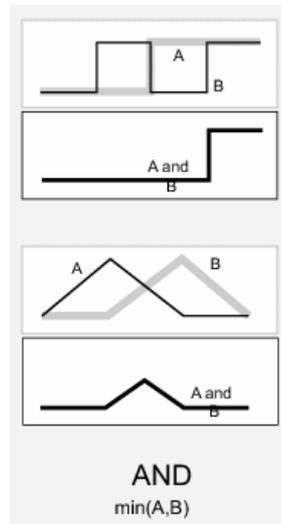


Figure 2. Operateur minimum

- Pour l'implication nous utilisons aussi l'operateur minimum.
- Pour l'agrégation nous utilisons aussi l'operateur maximum.

En général notre processus d'inférence fonctionne de la façon suivante :

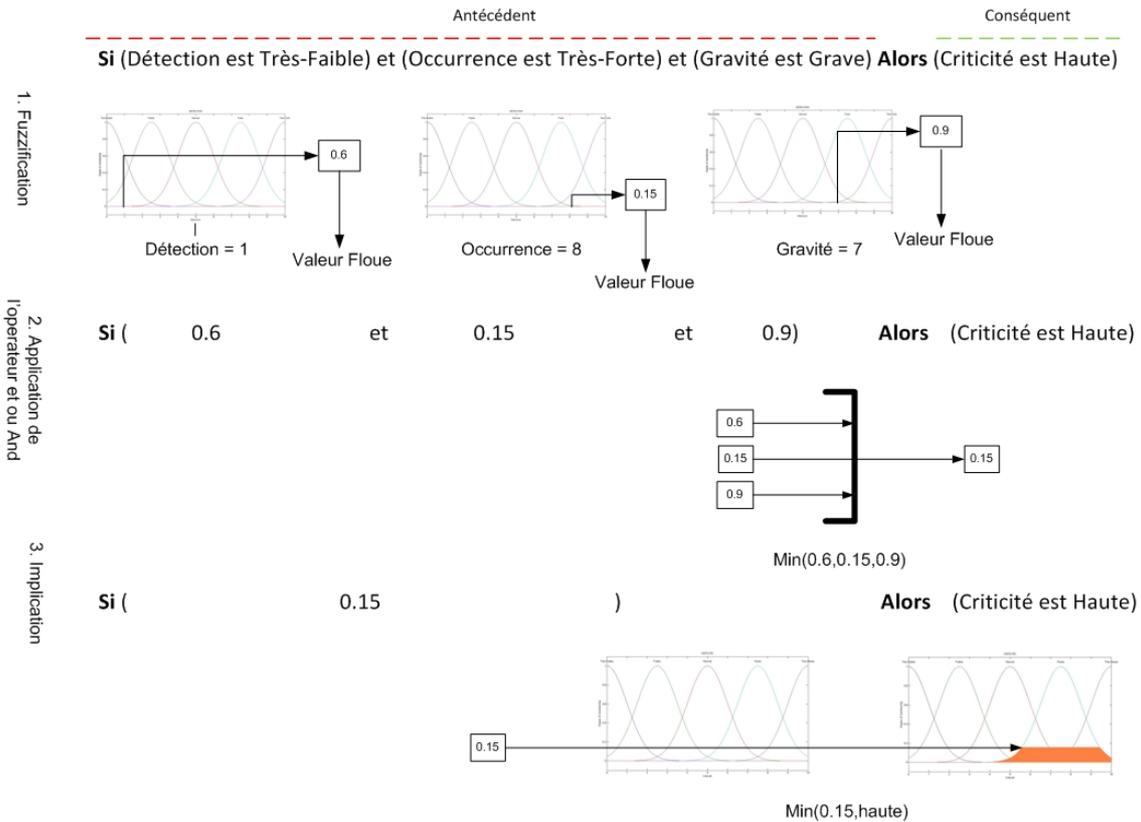


Figure 3. Processus d'inférence

La première étape consiste en la fuzzification des variables d'entrée puis la deuxième étape consiste en l'application des opérateurs « et » et « ou » sur les antécédents de la règle « active ».

Dans notre exemple nous avons des opérateurs « et » c'est à dire l'opérateur minimum donc la valeur retenue est la valeur floue la plus petite des trois entrées.

Finalement la dernière étape est l'implication où on récupère la valeur trouvée dans l'étape deux et l'applique sur la conséquence (« alors »), et ainsi trouver le degré d'appartenance de la sortie (criticité). Pour faire cette opération on utilise l'opérateur minimum selon notre modèle.

Le processus d'inférence global est ensuite basé sur une agrégation des différentes règles actives en utilisant l'opérateur « or » ou maximum. Cette agrégation est décrite dans la figure suivante.

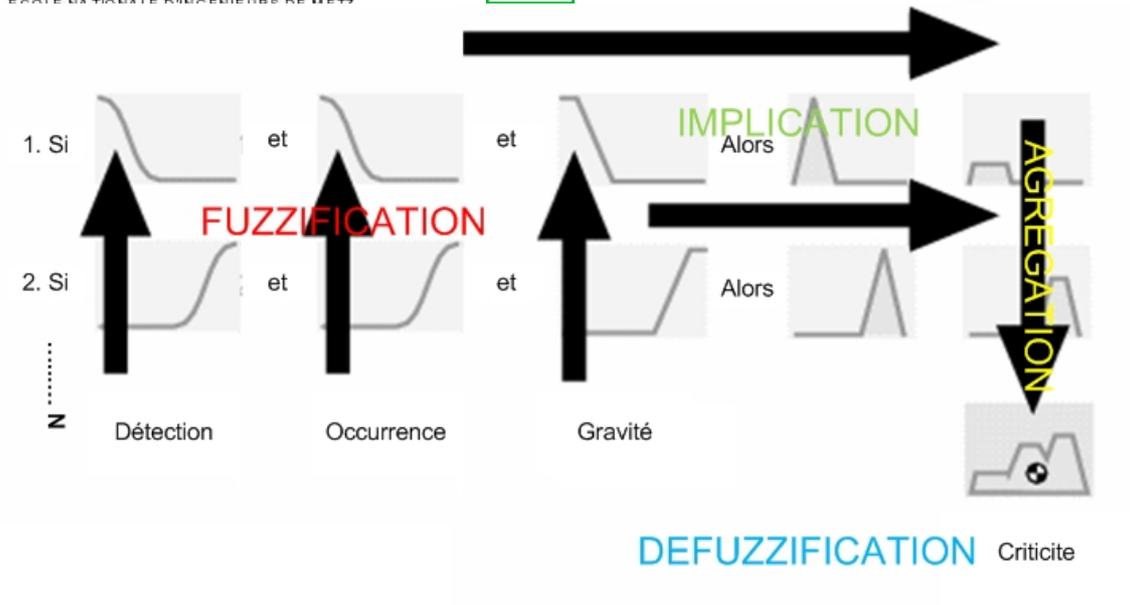


Figure 4. Processus d'inférence global

**ANNEXE 5**

**ALGORITHME D'AMÉLIORATION DE LA  
REPRÉSENTATION DE LA SURFACE EN 3D**

Lorsque le modèle flou est bien défini, nous pouvons demander au système de créer les surfaces de solutions du problème. Nous pouvons donc obtenir une surface en 3D qui représente l'ensemble des solutions de notre problème, c'est à dire la valeur de la criticité pour chaque combinaison possible des entrées. Cette surface se base sur la théorie de courbes spline et bezier présentées dans [Ruiz., 2002]. Un exemple des résultats de notre algorithme est présenté dans ce qui suit avec à gauche la surface avant l'optimisation et à droite la surface optimisée.

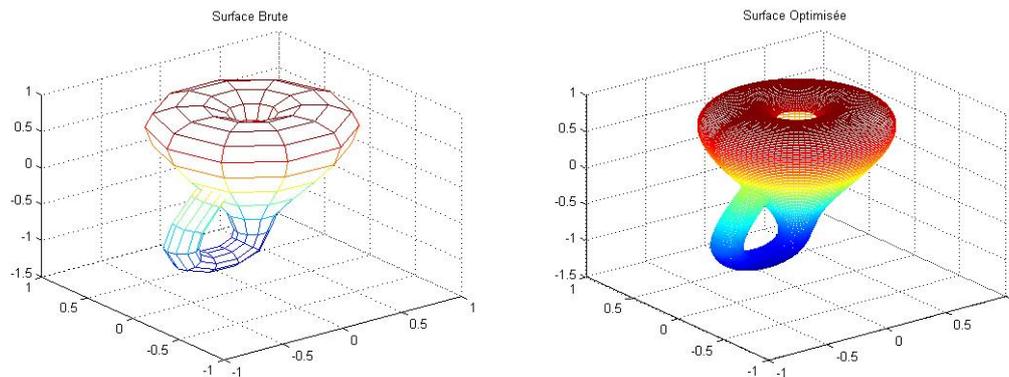


Figure 1. Optimisation

Cette optimisation nous permet d'obtenir une meilleure idée de la surface des solutions. En général, les logiciels qui créent une surface prennent une quantité déterminée de valeurs après avoir fait une évaluation en utilisant une fonction de la forme  $z = f(x, y)$  pour finalement déterminer la valeur de sortie. Mais, ces valeurs ou vecteurs d'entrée ne sont pas importants en nombre pour réduire les temps de simulation. Cela nous permet de mieux connaître la véritable évolution de la surface et du phénomène avec un degré de certitude plus élevé.

D'une manière générale notre algorithme prend les points déjà connus de la surface et regarde leur tendance pour créer de nouveaux points intermédiaires qui vont augmenter la représentation.

Nous avons développée un script qui permet interpoler une surface, en général cet algorithme prend les courbes qui conforme une surface et réalise un traitement de ces points pour générer plusieurs points de précision.

La méthode que nous avons développée réalise une interpolation soit du type Bezier ou Spline, le développement théorique de ces courbes est très bien explique dans [Ruiz., 2002].

## Application

L'application du module d'optimisation sur notre modèle à 125 règles donne les résultats suivants :

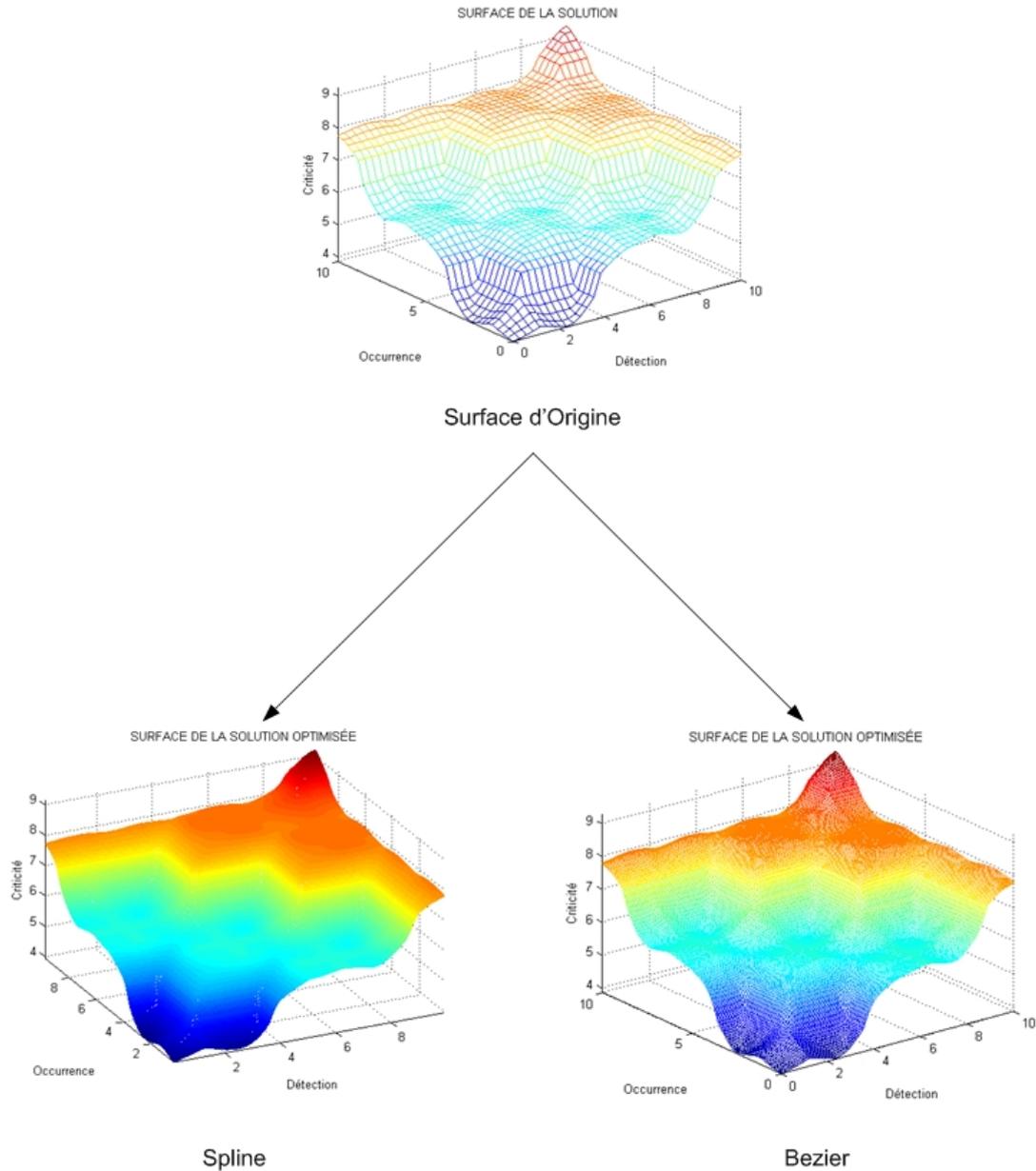


Figure 2. Optimisation du modèle à trois variables

Nous pouvons noter que l'interpolation du type spline prend plus de temps par rapport à l'interpolation du type bezier.

L'application du module d'optimisation sur notre modèle à 25 règles donne les résultats suivants :

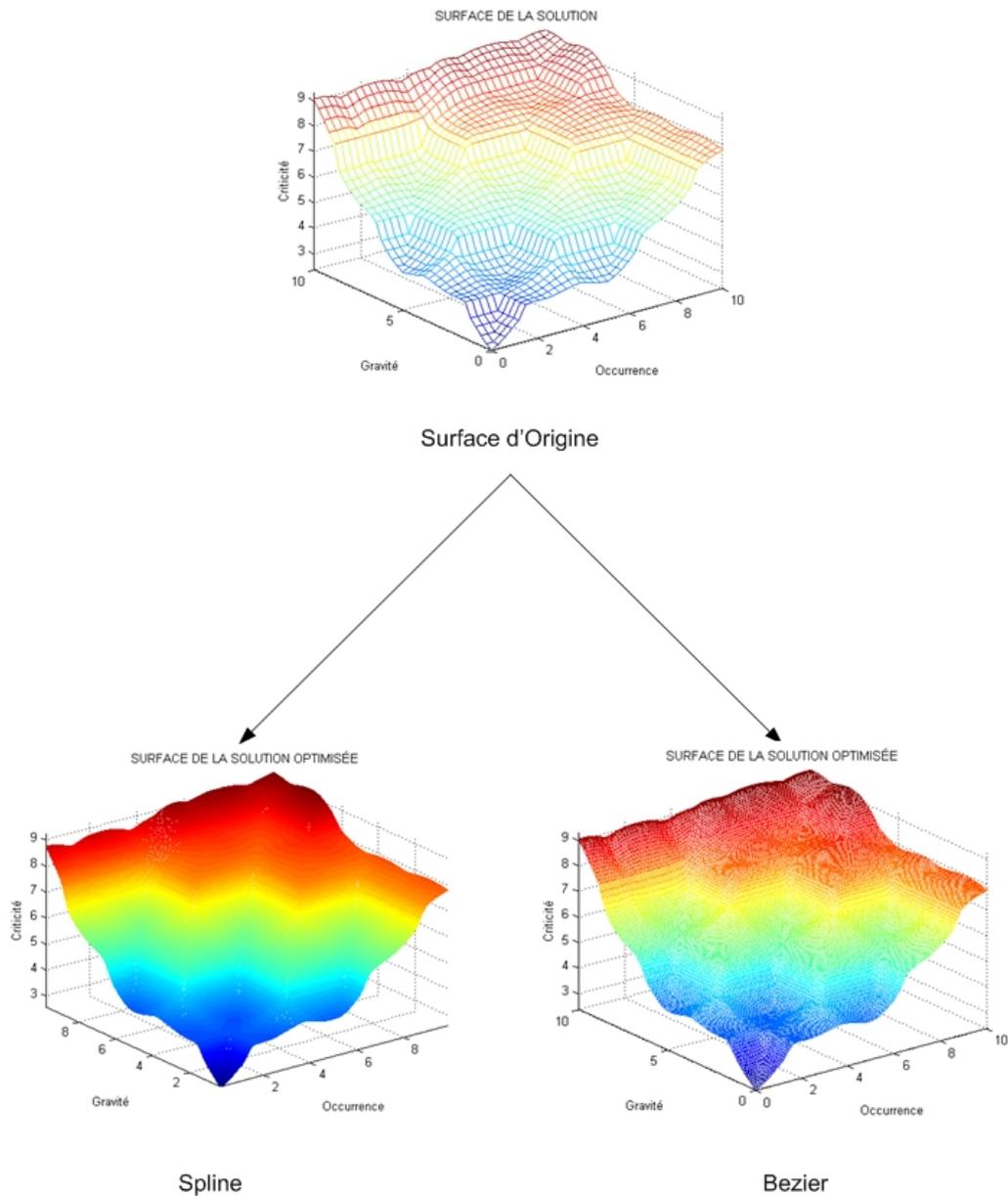


Figure 3. Optimisation du modèle a deux variables

## Programme

Dans notre programme nous avons créé un code principal et ses fonctions (figure 4), le langage que nous avons utilisée à été code matlab.

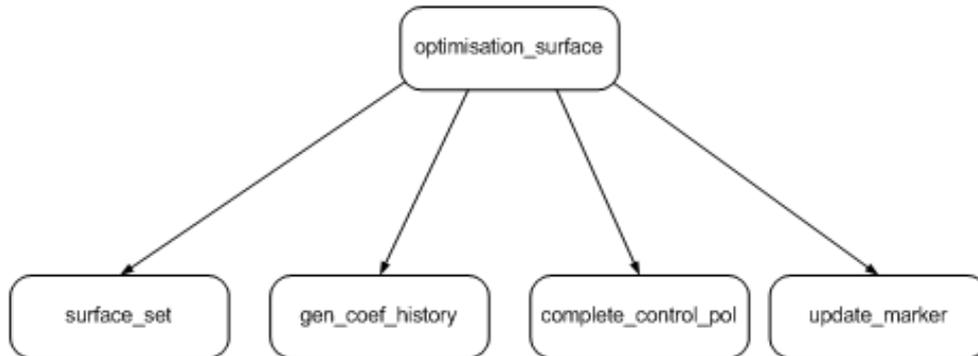


Figure 4. Code Principal et fonctions

Le code principal et ses fonctions sont présentés à continuation.

### optimisation\_surface

```

function
optimisation_surface(MPx,MPy,MPz,nom_entree_1,nom_entree_2,nom_sortie_
1,type_meridiens,type_paralleles)

points_paralleles = 3;
points_meridiens = 4;
fermeture_parallels = 'o';
fermeture_meridians = 'o';
d_param_paralleles = 0.1;
d_param_meridiens = 0.1;
u0=0;
uf=1;

[CX,CY,CZ]=surface_set(MPx,MPy,MPz,type_meridiens,type_paralleles,poin
ts_meridiens,points_paralleles,fermeture_meridians,fermeture_parallels
,d_param_meridiens,d_param_paralleles,u0,uf);

figure
mesh(CX,CY,CZ)
title('SURFACE DE LA SOLUTION
OPTIMISÉE'),xlabel(nom_entree_1),ylabel(nom_entree_2),zlabel(nom_sorti
e_1)

axis([min(min(CX)) max(max(CX)) min(min(CY)) max(max(CY)) min(min(CZ))
max(max(CZ))])
  
```

## surface\_set

```
function
[CX,CY,CZ]=surface_set(PX,PY,PZ,curve_typef,curve_typec,pts_stagef,pts
_stagec,closednessf,closednessc,duf,duc,u0,uf)
% INPUT:
% PX,PY,PZ: a control polygon with N points.
% curve_type: interpolation type
% 'b', 'B' (bezier), 's', 'S' (spline)
% pts_stage: points per stage.
% closedness: a character 'C' or 'c' means that the curve
% must be closed.
% d_u: parameter increment.
%
% OUTPUT:
% CX, CY, CZ: collection of sub-curves. Each
% column of the CX,CY,CZ matrices represents
% a curve stage. Their row number is determined
% by the number of levels dictated by the "d_u"
% parameter.
% H: The history of curve coefficients.
% This function completes and partitions the
% input control polygon into local control
% polygons to fit the local curves, as per
% the specified inputs. Each local curve follows
% the interpolation type, with the prescribed
% number of control points. In addition, the
% function is able to close the curve.

[Hf]=gen_coef_history(curve_typef,pts_stagef,u0,uf,duf);
[Hc]=gen_coef_history(curve_typec,pts_stagec,u0,uf,duc);

[temp_PX,temp_PY,temp_PZ]=complete_control_pol(PX',PY',PZ',pts_stagef,
curve_typef,closednessf);
[new_PX,new_PY,new_PZ]=complete_control_pol(temp_PX',temp_PY',temp_PZ'
,pts_stagec,curve_typec,closednessc);

[Nf,Nc]=size(new_PX);

lowf=1;
highf=pts_stagef;

CX=[];
CY=[];
CZ=[];

while (highf<=Nf)
    lowc=1;
    highc=pts_stagec;
    tempX=[];
    tempY=[];
    tempZ=[];
    while (highc<=Nc)
        QcX=new_PX(lowf:highf,lowc:highc);

        QcY=new_PY(lowf:highf,lowc:highc);
        QcZ=new_PZ(lowf:highf,lowc:highc);
```

```

    STGX=Hf*QcX*Hc';
    STGY=Hf*QcY*Hc';
    STGZ=Hf*QcZ*Hc';
    tempX=[tempX,STGX];
    tempY=[tempY,STGY];
    tempZ=[tempZ,STGZ];
    [lowc,highc]=update_markers(lowc,highc,curve_typec);
end
CX=[CX;tempX];
CY=[CY;tempY];
CZ=[CZ;tempZ];
[lowf,highf]=update_markers(lowf,highf,curve_typef);
end

```

### gen\_coef\_history

```

function [Mb]=gen_coef_history(curve_type,stage_size,u0,uf,du)
% INPUT:
% curve_type: 'b', 'B' (bezier),'s','S' (spline)
% stage_size: 2,3,...N, if type is Bezier
% 2,3,4 if type is Spline
% 3 if type is Own
% u0: initial parameter real value.
% uf: final parameter real value ( u0 <= uf )
% du: increment in parameter value
%
% OUTPUT:
% Mb(i,j): Bj-1(u0+(i-1)*du), where Bj( ) is the j-th
% interpolation coefficient. i=1,2,... and
% j=1,2,...
%
% Produces the history of curve coefficients for
% one the three cases, with the parameter "u"
% varying in the interval [u0,uf] in steps of
% size "du". The rows of Mb are determined by
% how many levels of the parameter "u" are
% there within [u0,uf] and the columns are
% terminated by the number of coefficients
% needed for the interpolation.

if (curve_type=='b'|curve_type=='B')
    Mb=[];
    for (u=u0:du:uf)
        [B]=bernstein(stage_size,u);
        Mb=[Mb;B];
    end
elseif (curve_type=='s'|curve_type=='S')
    M=calc_M(curve_type,stage_size);
    [U]=gen_mat_U(stage_size,u0,uf,du);
    Mb=U*M;
end
end

```

```

function
[new_PX,new_PY,new_PZ]=complete_control_pol(PX,PY,PZ,pts_per_stage,curve_type,closedness)
% INPUT:
% PX,PY,PZ: a control polygon.
% pts_per_stage: points per stage.
% curve_type: Bezier ('b'), Spline ('s') or Own ('o').
% closedness: Closed Curve ('C' or 'c') or
% Open Curve ('O' or 'o')
% OUTPUT:
% new_PX, new_PY, new_PZ:
% extended control polygon according to the prescription.

if (curve_type=='b'|curve_type=='B')
    if (closedness=='o'|closedness=='O')
        N=size(PX,2);
        %clacula el numero de stages que debe tener el poligono de
control
        stg_nec=ceil(N-1/(pts_per_stage-1));
        %clacula el numero de puntos que debe tener el poligono de
control
        ptos_nec=stg_nec*(pts_per_stage-1)+1;
        %clacula el numero de puntos que se deben agregar a el
poligono de control
        ptos_agre=ptos_nec-N;
        %identifica el punto que se debe agregar
        ptoX=PX(:,N);
        ptoY=PY(:,N);
        ptoZ=PZ(:,N);
        tmpX=[];
        tmpY=[];
        tmpZ=[];

        for (cont=1:ptos_agre)
            tmpX=[tmpX,ptoX];
            tmpY=[tmpY,ptoY];
            tmpZ=[tmpZ,ptoZ];

        end
        new_PX=[PX,tmpX];
        new_PY=[PY,tmpY];
        new_PZ=[PZ,tmpZ];
    elseif (closedness=='c'|closedness=='C')
        PX=[PX,PX(:,1)];
        PY=[PY,PY(:,1)];
        PZ=[PZ,PZ(:,1)];
        N=size(PX,2);
        %clacula el numero de stages que debe tener el poligono de
control
        stg_nec=ceil(N-1/(pts_per_stage-1));
        %clacula el numero de puntos que debe tener el poligono de
control
        ptos_nec=stg_nec*(pts_per_stage-1)+1;
        %clacula el numero de puntos que se deben agregar a el
poligono de control
        ptos_agre=ptos_nec-N;

        %identifica el punto que se debe agregar

```

```

ptoX=PX(:,1);
ptoY=PY(:,1);
ptoZ=PZ(:,1);
tmpX=[];
tmpY=[];
tmpZ=[];

for (cont=1:ptos_agre)
    tmpX=[tmpX,ptoX];
    tmpY=[tmpY,ptoY];
    tmpZ=[tmpZ,ptoZ];

end
new_PX=[PX,tmpX];
new_PY=[PY,tmpY];
new_PZ=[PZ,tmpZ];
end
elseif(curve_type=='s'|curve_type=='S')
    if (closedness=='o'|closedness=='O')
        new_PX=PX;
        new_PY=PY;
        new_PZ=PZ;
    elseif (closedness=='c'|closedness=='C')
        tmpX=PX(:,1:pts_per_stage-1);
        tmpY=PY(:,1:pts_per_stage-1);
        tmpZ=PZ(:,1:pts_per_stage-1);
        new_PX=[PX,tmpX];
        new_PY=[PY,tmpY];
        new_PZ=[PZ,tmpZ];
    end
end
end

```

### update\_marker

```

function [new_low,new_high]=update_markers(low,high,curve_type)
% INPUT:
% low: lower index of the control polygon within an array
% high: upper index of the control polygon within an array
% curve_type: 'b', 'B' (bezier), 's', 'S' (spline)
% OUTPUT:
% new_low, new_high: lower (upper) index of the control polygon for
% the next iteration, according to the curve type and stage size
% specified. Increases the markers used to extract control
% polygons from a data repository, from one iteration to the next. If
% type is Bezier or Own, the continuity prescribed is C0.

stage_size=high-low+1;

if (curve_type=='b'|curve_type=='B')
    new_low=high;
    new_high=high+stage_size-1;
elseif (curve_type=='s'|curve_type=='S')

    new_low=low+1;
    new_high=high+1;
end

```

**ANNEXE 6**

**FICHE DE GESTION DE RISQUES**

Projet diagnostique Turbine Francis

Fiche de gestion des risques

mise à jour le :  
responsable : Diego TOBON

Mode de défaillance	Gravité 1 - 10	Occurrence 1 - 10	Criticité		Cause	Prévention	Réparation
			Exacte	Arrondie			
Blocage d'alète mobile	7	4	7,4	8	Eau sableuse	Améliorer le filtrage (changer le type de filtre ou mettre en place des filtres de sécurité ou d'appui), pendant les pompages agir spécialement sur le zones de concentration des grosses cavaux	changer le boulon fusible
Usure sur les jointes d'étanchéité	4	6	6,6	7	Eau sableuse	Réaliser une inspection régulière avec le vidéoscope pour voir l'état de la surface, construire une historial pour mettre en rapport avec la date d'apparition de la fuite ou la dégradation avec l'état de l'eau et définir l'intervalle de remplacement	Remplacer les jointes
Fuites d'eau sur la jointe d'étanchéité	6	5	6,6	7	Eau sableuse		Remplacer les jointes
Dégât du tube d'admission et décharg	4	3	5,4	6	Eau sableuse		Comblér le trou ou changer le segment
Coussinet des alètes mobiles dégradé	4	4	5,4	6	Eau sableuse	Mettre en rapport avec le dégât avec l'état des filtres et les périodes de pompage de poussière pour permettre définir des périodes de rechange et pompapage plus adaptés	Changer le coussinet
Usure de la roue	4	3	5,4	6	Eau sableuse		Réparation du défaut ou remplacement de la roue
Usure sur les aubes	4	2	5,4	6	Eau sableuse		Réparation du défaut
Usure de la garniture mécanique de la roue	4	3	5,4	6	Eau sableuse	Réaliser une inspection régulière avec le vidéoscope pour définir des périodes de rechange plus adaptés	changer la garniture mécanique

**ANNEXE 7**

**AUTRES MODÈLES TESTÉS**

Pour le modèle à 53 règles nous avons défini plusieurs fois les règles pour essayer de trouver un modèle cohérente. Nous avons essayé de mettre en place des règles plus générales et de traiter les cases particulières sur une seule règle mais les résultats n'ont pas été motivants. Nous présentons a continuation les codes et les résultats associés a deux modèles que nous avons testé.

## Modèle à 53 règles version 2

[System]

Name='amdec\_2'

Type='mamdani'

Version=2.0

NumInputs=3

NumOutputs=1

NumRules=53

AndMethod='min'

OrMethod='max'

ImpMethod='min'

AggMethod='max'

DefuzzMethod='centroid'

[Input1]

Name='Détection'

Range=[0 10]

NumMFs=5

MF1='Trés-Faible': 'gaussmf', [0.9555 0.125]

MF2='Faible': 'gaussmf', [0.876 2.5]

MF3='Normal': 'gaussmf', [1 5]

MF4='Forte': 'gaussmf', [0.876 7.5]

MF5='Trés-Forte': 'gaussmf', [1.07 10]

[Input2]

Name='Occurrence'

Range=[0 10]

NumMFs=5

MF1='Rare': 'gaussmf', [1.12 0.125]

MF2='Occasionnelle': 'gaussmf', [0.876 2.5]

MF3='réguliere': 'gaussmf', [1 5]

MF4='Systématique': 'gaussmf', [0.854 7.5]

MF5='Trés-Forte': 'gaussmf', [1.22 10]

[Input3]

Name='Gravité'

Range=[0 10]

NumMFs=5

MF1='Trés-Faible': 'gaussmf', [0.9555 0.125]

MF2='Faible': 'gaussmf', [0.8313 2.5]

MF3='Normal': 'gaussmf', [1 5]

MF4='Grave': 'gaussmf', [0.831 7.5]

MF5='Trés-Grave': 'gaussmf', [1.062 10]

[Output1]

Name='Criticité'

Range=[0 10]

NumMFs=5

MF1='Trés-Faible': 'gaussmf', [0.9555 0.125]

MF2='Faible': 'gaussmf', [0.786 2.5]

MF3='Normal': 'gaussmf', [1 5]

MF4='Haute': 'gaussmf', [0.786 7.5]

MF5='Trés-Haute': 'gaussmf', [1.062 10]

[Rules]

0 0 5, 5 (1) : 1

5 5 0, 5 (1) : 1

0 5 4, 4 (1) : 1

0 4 4, 4 (1) : 1

0 5 3, 4 (1) : 1

0 4 3, 4 (1) : 1

0 5 2, 3 (1) : 1

0 4 2, 3 (1) : 1

2 4 0, 5 (1) : 1

1 4 0, 5 (1) : 1

0 3 4, 4 (1) : 1

0 5 1, 3 (1) : 1

0 4 1, 3 (1) : 1

0 3 1, 3 (1) : 1

2 3 3, 4 (1) : 1

1 3 3, 4 (1) : 1

2 3 2, 3 (1) : 1

1 3 2, 3 (1) : 1

3 3 3, 3 (1) : 1

0 2 4, 4 (1) : 1

0 2 2, 2 (1) : 1

5 1 1, 1 (1) : 1

4 1 1, 1 (1) : 1

5 2 1, 1 (1) : 1

4 2 1, 1 (1) : 1

5 4 3, 3 (1) : 1

4 4 3, 3 (1) : 1

5 3 2, 3 (1) : 1

4 3 2, 3 (1) : 1

3 3 2, 3 (1) : 1

2 3 2, 2 (1) : 1

1 3 2, 2 (1) : 1

3 3 1, 2 (1) : 1

4 3 1, 3 (1) : 1

5 3 1, 2 (1) : 1

3 2 3, 3 (1) : 1

2 2 3, 3 (1) : 1

1 2 3, 3 (1) : 1

4 2 3, 3 (1) : 1

5 2 3, 3 (1) : 1

3 2 1, 2 (1) : 1

2 2 1, 2 (1) : 1

1 2 1, 2 (1) : 1

0 1 4, 3 (1) : 1

0 1 3, 2 (1) : 1  
 3 1 2, 2 (1) : 1  
 2 1 2, 2 (1) : 1  
 1 1 2, 2 (1) : 1  
 4 1 2, 2 (1) : 1  
 5 1 2, 2 (1) : 1  
 3 1 1, 1 (1) : 1  
 2 1 1, 1 (1) : 1  
 1 1 1, 1 (1) : 1

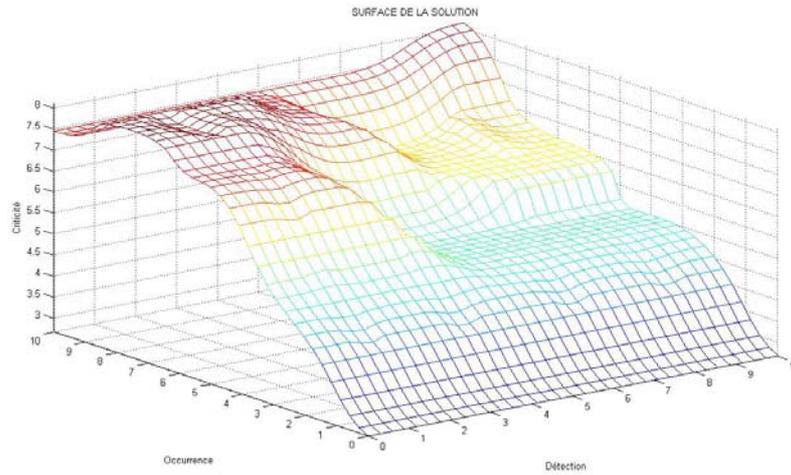


Figure 1. Occurrence vs Détection vs Criticité pour le modèle à 53 règles version 2

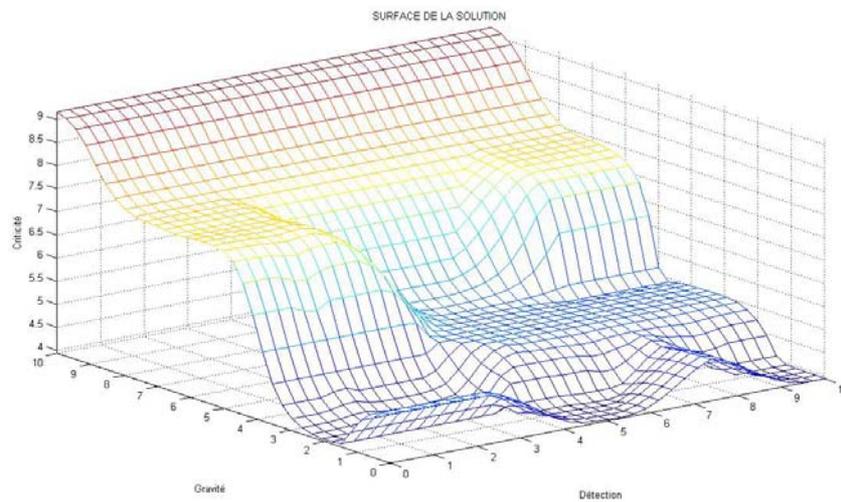


Figure 2. Gravité vs Détection vs Criticité pour le modèle à 53 règles version 2

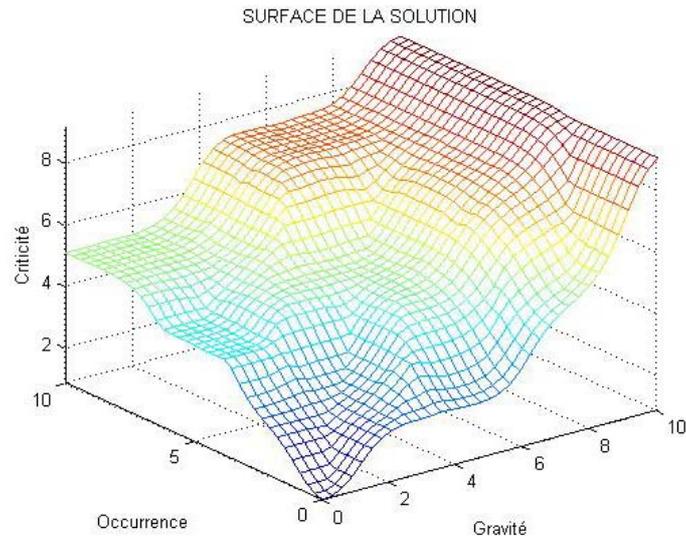


Figure 3. Gravité vs Détection vs Criticité pour le modèle à 53 règles version 2

### Modèle à 53 règles version 3

```
[System]
Name='amdec_3'
Type='mamdani'
Version=2.0
NumInputs=3
NumOutputs=1
NumRules=53
AndMethod='min'
OrMethod='max'
ImpMethod='min'
AggMethod='max'
DefuzzMethod='centroid'
```

```
[Input1]
Name='Détection'
Range=[0 10]
NumMFs=5
MF1='Très-Faible':gaussmf',[0.9555 0.125]
MF2='Faible':gaussmf',[1.062 2.5]
MF3='Normal':gaussmf',[1 5]
MF4='Forte':gaussmf',[1.10097270407706 7.5]
MF5='Très-Forte':gaussmf',[1.07 10]
```

```
[Input2]
Name='Occurrence'
Range=[0 10]
NumMFs=5
MF1='Rare':gaussmf',[1.12 0.125]
MF2='Occasionnelle':gaussmf',[0.876 2.5]
MF3='réguliere':gaussmf',[1 5]
MF4='Systématique':gaussmf',[0.854 7.5]
MF5='Très-Forte':gaussmf',[1.22 10]
```

[Input3]

Name='Gravité'

Range=[0 10]

NumMFs=5

MF1='Trés-Faible': 'gaussmf', [1 0.125]

MF2='Faible': 'gaussmf', [0.786409074340758 2.5]

MF3='Normal': 'gaussmf', [1 5]

MF4='Grave': 'gaussmf', [0.831346735731658 7.5]

MF5='Trés-Grave': 'gaussmf', [1.24702010359749 10]

[Output1]

Name='Criticité'

Range=[0 10]

NumMFs=5

MF1='Trés-Faible': 'gaussmf', [1 0]

MF2='Faible': 'gaussmf', [1 2.5]

MF3='Normal': 'gaussmf', [1 5]

MF4='Haute': 'gaussmf', [1 7.5]

MF5='Trés-Haute': 'gaussmf', [1 10]

[Rules]

0 0 5, 5 (1) : 1

5 5 0, 5 (1) : 1

0 5 4, 4 (1) : 1

0 4 4, 4 (1) : 1

0 5 3, 4 (1) : 1

0 4 3, 4 (1) : 1

0 5 2, 3 (1) : 1

0 4 2, 3 (1) : 1

2 4 0, 5 (1) : 1

1 4 0, 5 (1) : 1

0 3 4, 4 (1) : 1

0 5 1, 3 (1) : 1

0 4 1, 3 (1) : 1

0 3 1, 3 (1) : 1

2 3 3, 4 (1) : 1

1 3 3, 4 (1) : 1

2 3 2, 3 (1) : 1

1 3 2, 3 (1) : 1

3 3 3, 3 (1) : 1

0 2 4, 4 (1) : 1

0 2 2, 2 (1) : 1

5 1 1, 1 (1) : 1

4 1 1, 1 (1) : 1

5 2 1, 1 (1) : 1

4 2 1, 1 (1) : 1

5 4 3, 3 (1) : 1

4 4 3, 3 (1) : 1

5 3 2, 3 (1) : 1

4 3 2, 3 (1) : 1

3 3 2, 3 (1) : 1

2 3 2, 2 (1) : 1

1 3 2, 2 (1) : 1

3 3 1, 2 (1) : 1

4 3 1, 2 (1) : 1

5 3 1, 2 (1) : 1  
 3 2 3, 3 (1) : 1  
 2 2 3, 3 (1) : 1  
 1 2 3, 3 (1) : 1  
 4 2 3, 3 (1) : 1  
 5 2 3, 3 (1) : 1  
 3 2 1, 2 (1) : 1  
 2 2 1, 2 (1) : 1  
 1 2 1, 2 (1) : 1  
 0 1 4, 3 (1) : 1  
 0 1 3, 2 (1) : 1  
 3 1 2, 2 (1) : 1  
 2 1 2, 2 (1) : 1  
 1 1 2, 2 (1) : 1  
 4 1 2, 2 (1) : 1  
 5 1 2, 2 (1) : 1  
 3 1 1, 1 (1) : 1  
 2 1 1, 1 (1) : 1  
 1 1 1, 1 (1) : 1

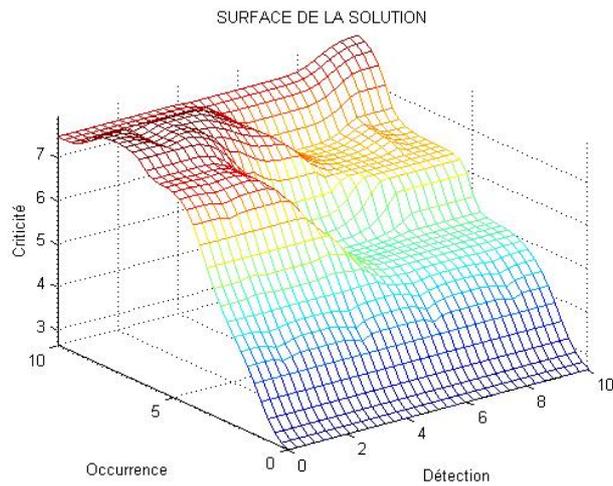


Figure 4. Occurrence vs Détection vs Criticité pour le modèle à 53 règles version 3

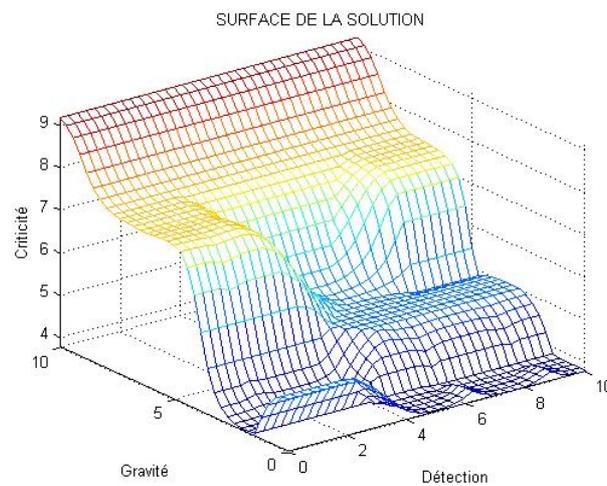


Figure 5. Gravité vs Détection vs Criticité pour le modèle à 53 règles version 3

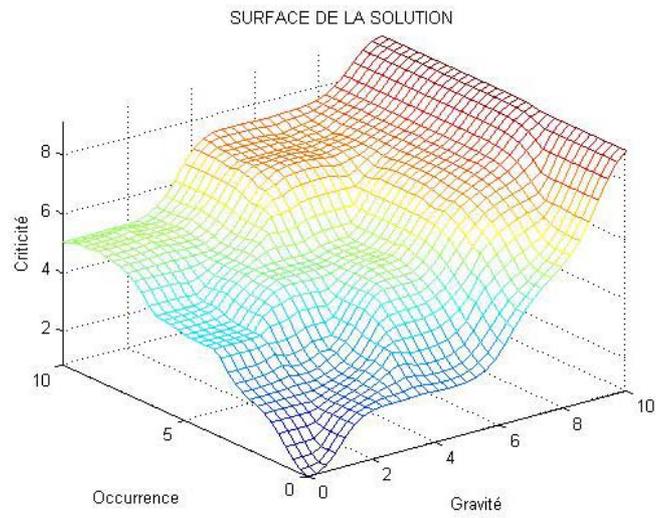


Figure 6. Gravité vs Détection vs Criticité pour le modèle à 53 règles version 3

## ANNEXE 8

# MODÈLE À 125 RÈGLES

Pour créer notre modèle flou, nous avons utilisé le Toolbox de Fuzzy Logic du logiciel Matlab<sup>®</sup>, dans ce toolbox nous avons créé un fichier qui contient la définition de la totalité de notre modèle à cent vingt-cinq règles. Est à dire ce fichier comprend la définition des fonctions d'appartenance, des règles, méthodes d'implication... etc. A continuation le fichier Matlab suivi des règles.

### Fichier Matlab

```
[System]
Name='Trois_Variables'
Type='mamdani'
Version=2.0
NumInputs=3
NumOutputs=1
NumRules=125
AndMethod='min'
OrMethod='max'
ImpMethod='min'
AggMethod='max'
DefuzzMethod='custom_defuzz'

[Input1]
Name='Détection'
Range=[0 10]
NumMFs=5
MF1='Tres-Faible':'gaussmf',[1 0]
MF2='Faible':'gaussmf',[1 2.5]
MF3='Normal':'gaussmf',[1 5]
MF4='Forte':'gaussmf',[1 7.5]
MF5='Trés-Forte':'gaussmf',[1 10]

[Input2]
Name='Occurrence'
Range=[0 10]
NumMFs=5
MF1='Rare':'gaussmf',[1 0]
MF2='Occasionnelle':'gaussmf',[1 2.5]
MF3='réguliere':'gaussmf',[1 5]
MF4='Systématique':'gaussmf',[1 7.5]
MF5='Trés-Forte':'gaussmf',[1 10]

[Input3]
Name='Gravité'
Range=[0 10]
NumMFs=5
MF1='Trés-Faible':'gaussmf',[1 0]
MF2='Faible':'gaussmf',[1 2.5]
MF3='Normal':'gaussmf',[1 5]
MF4='Grave':'gaussmf',[1 7.5]
MF5='Trés-Grave':'gaussmf',[1 10]

[Output1]
Name='Criticité'
Range=[0 10]
NumMFs=5
MF1='Trés-Faible':'gaussmf',[1 0]
MF2='Faible':'gaussmf',[1 2.5]
```

```
MF3='Normal': 'gaussmf', [1 5]  
MF4='Haute': 'gaussmf', [1 7.5]  
MF5='Très-Haute': 'gaussmf', [1 10]
```

```
[Rules]  
1 1 1, 1 (1) : 1  
1 1 2, 2 (1) : 1  
1 1 3, 2 (1) : 1  
1 1 4, 3 (1) : 1  
1 1 5, 5 (1) : 1  
1 2 1, 2 (1) : 1  
1 2 2, 2 (1) : 1  
1 2 3, 2 (1) : 1  
1 2 4, 3 (1) : 1  
1 2 5, 5 (1) : 1  
1 3 1, 2 (1) : 1  
1 3 2, 2 (1) : 1  
1 3 3, 3 (1) : 1  
1 3 4, 3 (1) : 1  
1 3 5, 5 (1) : 1  
1 4 1, 3 (1) : 1  
1 4 2, 3 (1) : 1  
1 4 3, 3 (1) : 1  
1 4 4, 3 (1) : 1  
1 4 5, 5 (1) : 1  
1 5 1, 3 (1) : 1  
1 5 2, 3 (1) : 1  
1 5 3, 4 (1) : 1  
1 5 4, 4 (1) : 1  
1 5 5, 5 (1) : 1  
2 1 1, 2 (1) : 1  
2 1 2, 2 (1) : 1  
2 1 3, 2 (1) : 1  
2 1 4, 3 (1) : 1  
2 1 5, 5 (1) : 1  
2 2 1, 2 (1) : 1  
2 2 2, 2 (1) : 1  
2 2 3, 3 (1) : 1  
2 2 4, 3 (1) : 1  
2 2 5, 5 (1) : 1  
2 3 1, 2 (1) : 1  
2 3 2, 3 (1) : 1  
2 3 3, 3 (1) : 1  
2 3 4, 3 (1) : 1  
2 3 5, 5 (1) : 1  
2 4 1, 3 (1) : 1  
2 4 2, 3 (1) : 1  
2 4 3, 3 (1) : 1  
2 4 4, 4 (1) : 1  
2 4 5, 5 (1) : 1  
2 5 1, 3 (1) : 1  
2 5 2, 4 (1) : 1  
2 5 3, 4 (1) : 1  
2 5 4, 4 (1) : 1  
2 5 5, 5 (1) : 1  
3 1 1, 2 (1) : 1  
3 1 2, 2 (1) : 1  
3 1 3, 3 (1) : 1  
3 1 4, 3 (1) : 1
```

3 1 5, 5 (1) : 1  
3 2 1, 2 (1) : 1  
3 2 2, 3 (1) : 1  
3 2 3, 3 (1) : 1  
3 2 4, 3 (1) : 1  
3 2 5, 5 (1) : 1  
3 3 1, 3 (1) : 1  
3 3 2, 3 (1) : 1  
3 3 3, 3 (1) : 1  
3 3 4, 4 (1) : 1  
3 3 5, 5 (1) : 1  
3 4 1, 3 (1) : 1  
3 4 2, 3 (1) : 1  
3 4 3, 4 (1) : 1  
3 4 4, 4 (1) : 1  
3 4 5, 5 (1) : 1  
3 5 1, 4 (1) : 1  
3 5 2, 4 (1) : 1  
3 5 3, 4 (1) : 1  
3 5 4, 4 (1) : 1  
3 5 5, 5 (1) : 1  
4 1 1, 3 (1) : 1  
4 1 2, 3 (1) : 1  
4 1 3, 3 (1) : 1  
4 1 4, 3 (1) : 1  
4 1 5, 5 (1) : 1  
4 2 1, 3 (1) : 1  
4 2 2, 3 (1) : 1  
4 2 3, 3 (1) : 1  
4 2 4, 4 (1) : 1  
4 2 5, 5 (1) : 1  
4 3 1, 3 (1) : 1  
4 3 2, 3 (1) : 1  
4 3 3, 4 (1) : 1  
4 3 4, 4 (1) : 1  
4 3 5, 5 (1) : 1  
4 4 1, 3 (1) : 1  
4 4 2, 4 (1) : 1  
4 4 3, 4 (1) : 1  
4 4 4, 4 (1) : 1  
4 4 5, 5 (1) : 1  
4 5 1, 4 (1) : 1  
4 5 2, 4 (1) : 1  
4 5 3, 4 (1) : 1  
4 5 4, 5 (1) : 1  
4 5 5, 5 (1) : 1  
5 1 1, 3 (1) : 1  
5 1 2, 3 (1) : 1  
5 1 3, 4 (1) : 1  
5 1 4, 4 (1) : 1  
5 1 5, 5 (1) : 1  
5 2 1, 3 (1) : 1  
5 2 2, 4 (1) : 1  
5 2 3, 4 (1) : 1  
5 2 4, 4 (1) : 1  
5 2 5, 5 (1) : 1  
5 3 1, 4 (1) : 1  
5 3 2, 4 (1) : 1  
5 3 3, 4 (1) : 1  
5 3 4, 4 (1) : 1

5 3 5, 5 (1) : 1  
5 4 1, 4 (1) : 1  
5 4 2, 4 (1) : 1  
5 4 3, 4 (1) : 1  
5 4 4, 5 (1) : 1  
5 4 5, 5 (1) : 1  
5 5 1, 4 (1) : 1  
5 5 2, 4 (1) : 1  
5 5 3, 5 (1) : 1  
5 5 4, 5 (1) : 1  
5 5 5, 5 (1) : 1

## Règles

1. Si (Détection est Très-Faible) et (Occurrence est Rare) et (Gravité est Très-Faible) Alors (Criticité est Très-Faible)
2. Si (Détection est Très-Faible) et (Occurrence est Rare) et (Gravité est Faible) Alors (Criticité est Faible)
3. Si (Détection est Très-Faible) et (Occurrence est Rare) et (Gravité est Normal) Alors (Criticité est Faible)
4. Si (Détection est Très-Faible) et (Occurrence est Rare) et (Gravité est Grave) Alors (Criticité est Normal)
5. Si (Détection est Très-Faible) et (Occurrence est Rare) et (Gravité est Très-Grave) Alors (Criticité est Très-Haute)
6. Si (Détection est Très-Faible) et (Occurrence est Occasionnelle) et (Gravité est Très-Faible) Alors (Criticité est Faible)
7. Si (Détection est Très-Faible) et (Occurrence est Occasionnelle) et (Gravité est Faible) Alors (Criticité est Faible)
8. Si (Détection est Très-Faible) et (Occurrence est Occasionnelle) et (Gravité est Normal) Alors (Criticité est Faible)
9. Si (Détection est Très-Faible) et (Occurrence est Occasionnelle) et (Gravité est Grave) Alors (Criticité est Normal)
10. Si (Détection est Très-Faible) et (Occurrence est Occasionnelle) et (Gravité est Très-Grave) Alors (Criticité est Très-Haute)
11. Si (Détection est Très-Faible) et (Occurrence est régulière) et (Gravité est Très-Faible) Alors (Criticité est Faible)
12. Si (Détection est Très-Faible) et (Occurrence est régulière) et (Gravité est Faible) Alors (Criticité est Faible)
13. Si (Détection est Très-Faible) et (Occurrence est régulière) et (Gravité est Normal) Alors (Criticité est Normal)
14. Si (Détection est Très-Faible) et (Occurrence est régulière) et (Gravité est Grave) Alors (Criticité est Normal)
15. Si (Détection est Très-Faible) et (Occurrence est régulière) et (Gravité est Très-Grave) Alors (Criticité est Très-Haute)
16. Si (Détection est Très-Faible) et (Occurrence est Systématique) et (Gravité est Très-Faible) Alors (Criticité est Normal)
17. Si (Détection est Très-Faible) et (Occurrence est Systématique) et (Gravité est Faible) Alors (Criticité est Normal)
18. Si (Détection est Très-Faible) et (Occurrence est Systématique) et (Gravité est Normal) Alors (Criticité est Normal)
19. Si (Détection est Très-Faible) et (Occurrence est Systématique) et (Gravité est Grave) Alors (Criticité est Normal)

20. Si (Détection est Très-Faible) et (Occurrence est Systématique) et (Gravité est Très-Grave) Alors (Criticité est Très-Haute)
21. Si (Détection est Très-Faible) et (Occurrence est Très-Forte) et (Gravité est Très-Faible) Alors (Criticité est Normal)
22. Si (Détection est Très-Faible) et (Occurrence est Très-Forte) et (Gravité est Faible) Alors (Criticité est Normal)
23. Si (Détection est Très-Faible) et (Occurrence est Très-Forte) et (Gravité est Normal) Alors (Criticité est Haute)
24. Si (Détection est Très-Faible) et (Occurrence est Très-Forte) et (Gravité est Grave) Alors (Criticité est Haute)
25. Si (Détection est Très-Faible) et (Occurrence est Très-Forte) et (Gravité est Très-Grave) Alors (Criticité est Très-Haute)
26. Si (Détection est Faible) et (Occurrence est Rare) et (Gravité est Très-Faible) Alors (Criticité est Faible)
27. Si (Détection est Faible) et (Occurrence est Rare) et (Gravité est Faible) Alors (Criticité est Faible)
28. Si (Détection est Faible) et (Occurrence est Rare) et (Gravité est Normal) Alors (Criticité est Faible)
29. Si (Détection est Faible) et (Occurrence est Rare) et (Gravité est Grave) Alors (Criticité est Normal)
30. Si (Détection est Faible) et (Occurrence est Rare) et (Gravité est Très-Grave) Alors (Criticité est Très-Haute)
31. Si (Détection est Faible) et (Occurrence est Occasionnelle) et (Gravité est Très-Faible) Alors (Criticité est Faible)
32. Si (Détection est Faible) et (Occurrence est Occasionnelle) et (Gravité est Faible) Alors (Criticité est Faible)
33. Si (Détection est Faible) et (Occurrence est Occasionnelle) et (Gravité est Normal) Alors (Criticité est Normal)
34. Si (Détection est Faible) et (Occurrence est Occasionnelle) et (Gravité est Grave) Alors (Criticité est Normal)
35. Si (Détection est Faible) et (Occurrence est Occasionnelle) et (Gravité est Très-Grave) Alors (Criticité est Très-Haute)
36. Si (Détection est Faible) et (Occurrence est régulière) et (Gravité est Très-Faible) Alors (Criticité est Faible)
37. Si (Détection est Faible) et (Occurrence est régulière) et (Gravité est Faible) Alors (Criticité est Normal)
38. Si (Détection est Faible) et (Occurrence est régulière) et (Gravité est Normal) Alors (Criticité est Normal)
39. Si (Détection est Faible) et (Occurrence est régulière) et (Gravité est Grave) Alors (Criticité est Normal)
40. Si (Détection est Faible) et (Occurrence est régulière) et (Gravité est Très-Grave) Alors (Criticité est Très-Haute)
41. Si (Détection est Faible) et (Occurrence est Systématique) et (Gravité est Très-Faible) Alors (Criticité est Normal)
42. Si (Détection est Faible) et (Occurrence est Systématique) et (Gravité est Faible) Alors (Criticité est Normal)
43. Si (Détection est Faible) et (Occurrence est Systématique) et (Gravité est Normal) Alors (Criticité est Normal)
44. Si (Détection est Faible) et (Occurrence est Systématique) et (Gravité est Grave) Alors (Criticité est Haute)
45. Si (Détection est Faible) et (Occurrence est Systématique) et (Gravité est Très-Grave) Alors

(Criticité est Très-Haute)

46. Si (Détection est Faible) et (Occurrence est Très-Forte) et (Gravité est Très-Faible) Alors (Criticité est Normal)

47. Si (Détection est Faible) et (Occurrence est Très-Forte) et (Gravité est Faible) Alors (Criticité est Haute)

48. Si (Détection est Faible) et (Occurrence est Très-Forte) et (Gravité est Normal) Alors (Criticité est Haute)

49. Si (Détection est Faible) et (Occurrence est Très-Forte) et (Gravité est Grave) Alors (Criticité est Haute)

50. Si (Détection est Faible) et (Occurrence est Très-Forte) et (Gravité est Très-Grave) Alors (Criticité est Très-Haute)

51. Si (Détection est Normal) et (Occurrence est Rare) et (Gravité est Très-Faible) Alors (Criticité est Faible)

52. Si (Détection est Normal) et (Occurrence est Rare) et (Gravité est Faible) Alors (Criticité est Faible)

53. Si (Détection est Normal) et (Occurrence est Rare) et (Gravité est Normal) Alors (Criticité est Normal)

54. Si (Détection est Normal) et (Occurrence est Rare) et (Gravité est Grave) Alors (Criticité est Normal)

55. Si (Détection est Normal) et (Occurrence est Rare) et (Gravité est Très-Grave) Alors (Criticité est Très-Haute)

56. Si (Détection est Normal) et (Occurrence est Occasionnelle) et (Gravité est Très-Faible) Alors (Criticité est Faible)

57. Si (Détection est Normal) et (Occurrence est Occasionnelle) et (Gravité est Faible) Alors (Criticité est Normal)

58. Si (Détection est Normal) et (Occurrence est Occasionnelle) et (Gravité est Normal) Alors (Criticité est Normal)

59. Si (Détection est Normal) et (Occurrence est Occasionnelle) et (Gravité est Grave) Alors (Criticité est Normal)

60. Si (Détection est Normal) et (Occurrence est Occasionnelle) et (Gravité est Très-Grave) Alors (Criticité est Très-Haute)

61. Si (Détection est Normal) et (Occurrence est régulière) et (Gravité est Très-Faible) Alors (Criticité est Normal)

62. Si (Détection est Normal) et (Occurrence est régulière) et (Gravité est Faible) Alors (Criticité est Normal)

63. Si (Détection est Normal) et (Occurrence est régulière) et (Gravité est Normal) Alors (Criticité est Normal)

64. Si (Détection est Normal) et (Occurrence est régulière) et (Gravité est Grave) Alors (Criticité est Haute)

65. Si (Détection est Normal) et (Occurrence est régulière) et (Gravité est Très-Grave) Alors (Criticité est Très-Haute)

66. Si (Détection est Normal) et (Occurrence est Systématique) et (Gravité est Très-Faible) Alors (Criticité est Normal)

67. Si (Détection est Normal) et (Occurrence est Systématique) et (Gravité est Faible) Alors (Criticité est Normal)

68. Si (Détection est Normal) et (Occurrence est Systématique) et (Gravité est Normal) Alors (Criticité est Haute)

69. Si (Détection est Normal) et (Occurrence est Systématique) et (Gravité est Grave) Alors (Criticité est Haute)

70. Si (Détection est Normal) et (Occurrence est Systématique) et (Gravité est Très-Grave) Alors (Criticité est Très-Haute)

71. Si (Détection est Normal) et (Occurrence est Très-Forte) et (Gravité est Très-Faible) Alors (Criticité est Haute)
72. Si (Détection est Normal) et (Occurrence est Très-Forte) et (Gravité est Faible) Alors (Criticité est Haute)
73. Si (Détection est Normal) et (Occurrence est Très-Forte) et (Gravité est Normal) Alors (Criticité est Haute)
74. Si (Détection est Normal) et (Occurrence est Très-Forte) et (Gravité est Grave) Alors (Criticité est Haute)
75. Si (Détection est Normal) et (Occurrence est Très-Forte) et (Gravité est Très-Grave) Alors (Criticité est Très-Haute)
76. Si (Détection est Forte) et (Occurrence est Rare) et (Gravité est Très-Faible) Alors (Criticité est Normal)
77. Si (Détection est Forte) et (Occurrence est Rare) et (Gravité est Faible) Alors (Criticité est Normal)
78. Si (Détection est Forte) et (Occurrence est Rare) et (Gravité est Normal) Alors (Criticité est Normal)
79. Si (Détection est Forte) et (Occurrence est Rare) et (Gravité est Grave) Alors (Criticité est Normal)
80. Si (Détection est Forte) et (Occurrence est Rare) et (Gravité est Très-Grave) Alors (Criticité est Très-Haute)
81. Si (Détection est Forte) et (Occurrence est Occasionnelle) et (Gravité est Très-Faible) Alors (Criticité est Normal)
82. Si (Détection est Forte) et (Occurrence est Occasionnelle) et (Gravité est Faible) Alors (Criticité est Normal)
83. Si (Détection est Forte) et (Occurrence est Occasionnelle) et (Gravité est Normal) Alors (Criticité est Normal)
84. Si (Détection est Forte) et (Occurrence est Occasionnelle) et (Gravité est Grave) Alors (Criticité est Haute)
85. Si (Détection est Forte) et (Occurrence est Occasionnelle) et (Gravité est Très-Grave) Alors (Criticité est Très-Haute)
86. Si (Détection est Forte) et (Occurrence est régulière) et (Gravité est Très-Faible) Alors (Criticité est Normal)
87. Si (Détection est Forte) et (Occurrence est régulière) et (Gravité est Faible) Alors (Criticité est Normal)
88. Si (Détection est Forte) et (Occurrence est régulière) et (Gravité est Normal) Alors (Criticité est Haute)
89. Si (Détection est Forte) et (Occurrence est régulière) et (Gravité est Grave) Alors (Criticité est Haute)
90. Si (Détection est Forte) et (Occurrence est régulière) et (Gravité est Très-Grave) Alors (Criticité est Très-Haute)
91. Si (Détection est Forte) et (Occurrence est Systématique) et (Gravité est Très-Faible) Alors (Criticité est Normal)
92. Si (Détection est Forte) et (Occurrence est Systématique) et (Gravité est Faible) Alors (Criticité est Haute)
93. Si (Détection est Forte) et (Occurrence est Systématique) et (Gravité est Normal) Alors (Criticité est Haute)
94. Si (Détection est Forte) et (Occurrence est Systématique) et (Gravité est Grave) Alors (Criticité est Haute)
95. Si (Détection est Forte) et (Occurrence est Systématique) et (Gravité est Très-Grave) Alors (Criticité est Très-Haute)
96. Si (Détection est Forte) et (Occurrence est Très-Forte) et (Gravité est Très-Faible) Alors

(Criticité est Haute)

97. Si (Détection est Forte) et (Occurrence est Très-Forte) et (Gravité est Faible) Alors (Criticité est Haute)

98. Si (Détection est Forte) et (Occurrence est Très-Forte) et (Gravité est Normal) Alors (Criticité est Haute)

99. Si (Détection est Forte) et (Occurrence est Très-Forte) et (Gravité est Grave) Alors (Criticité est Très-Haute)

100. Si (Détection est Forte) et (Occurrence est Très-Forte) et (Gravité est Très-Grave) Alors (Criticité est Très-Haute)

101. Si (Détection est Très-Forte) et (Occurrence est Rare) et (Gravité est Très-Faible) Alors (Criticité est Normal)

102. Si (Détection est Très-Forte) et (Occurrence est Rare) et (Gravité est Faible) Alors (Criticité est Normal)

103. Si (Détection est Très-Forte) et (Occurrence est Rare) et (Gravité est Normal) Alors (Criticité est Haute)

104. Si (Détection est Très-Forte) et (Occurrence est Rare) et (Gravité est Grave) Alors (Criticité est Haute)

105. Si (Détection est Très-Forte) et (Occurrence est Rare) et (Gravité est Très-Grave) Alors (Criticité est Très-Haute)

106. Si (Détection est Très-Forte) et (Occurrence est Occasionnelle) et (Gravité est Très-Faible) Alors (Criticité est Normal)

107. Si (Détection est Très-Forte) et (Occurrence est Occasionnelle) et (Gravité est Faible) Alors (Criticité est Haute)

108. Si (Détection est Très-Forte) et (Occurrence est Occasionnelle) et (Gravité est Normal) Alors (Criticité est Haute)

109. Si (Détection est Très-Forte) et (Occurrence est Occasionnelle) et (Gravité est Grave) Alors (Criticité est Haute)

110. Si (Détection est Très-Forte) et (Occurrence est Occasionnelle) et (Gravité est Très-Grave) Alors (Criticité est Très-Haute)

111. Si (Détection est Très-Forte) et (Occurrence est régulière) et (Gravité est Très-Faible) Alors (Criticité est Haute)

112. Si (Détection est Très-Forte) et (Occurrence est régulière) et (Gravité est Faible) Alors (Criticité est Haute)

113. Si (Détection est Très-Forte) et (Occurrence est régulière) et (Gravité est Normal) Alors (Criticité est Haute)

114. Si (Détection est Très-Forte) et (Occurrence est régulière) et (Gravité est Grave) Alors (Criticité est Haute)

115. Si (Détection est Très-Forte) et (Occurrence est régulière) et (Gravité est Très-Grave) Alors (Criticité est Très-Haute)

116. Si (Détection est Très-Forte) et (Occurrence est Systématique) et (Gravité est Très-Faible) Alors (Criticité est Haute)

117. Si (Détection est Très-Forte) et (Occurrence est Systématique) et (Gravité est Faible) Alors (Criticité est Haute)

118. Si (Détection est Très-Forte) et (Occurrence est Systématique) et (Gravité est Normal) Alors (Criticité est Haute)

119. Si (Détection est Très-Forte) et (Occurrence est Systématique) et (Gravité est Grave) Alors (Criticité est Très-Haute)

120. Si (Détection est Très-Forte) et (Occurrence est Systématique) et (Gravité est Très-Grave) Alors (Criticité est Très-Haute)

121. Si (Détection est Très-Forte) et (Occurrence est Très-Forte) et (Gravité est Très-Faible) Alors (Criticité est Haute)

122. Si (Détection est Très-Forte) et (Occurrence est Très-Forte) et (Gravité est Faible) Alors (Criticité est Haute)
123. Si (Détection est Très-Forte) et (Occurrence est Très-Forte) et (Gravité est Normal) Alors (Criticité est Très-Haute)
124. Si (Détection est Très-Forte) et (Occurrence est Très-Forte) et (Gravité est Grave) Alors (Criticité est Très-Haute)
125. Si (Détection est Très-Forte) et (Occurrence est Très-Forte) et (Gravité est Très-Grave) Alors (Criticité est Très-Haute)

**ANNEXE 9**

**MODÈLE À 53 RÈGLES**

Pour créer notre modèle flou, nous avons utilisé le Toolbox de Fuzzy Logic du logiciel Matlab<sup>®</sup>, dans ce toolbox nous avons créé un fichier qui contient la définition de la totalité de notre modèle à cinquante-trois règles. Est à dire ce fichier comprend la définition des fonctions d'appartenance, des règles, méthodes d'implication... etc. A continuation le fichier Matlab suivi des règles.

### Fichier Matlab

```
[System]
Name='Trois_Variables_53'
Type='mamdani'
Version=2.0
NumInputs=3
NumOutputs=1
NumRules=53
EtMethod='min'
OrMethod='max'
ImpMethod='min'
AggMethod='max'
DefuzzMethod='custom_defuzz'

[Input1]
Name='Détection'
Range=[0 10]
NumMFs=5
MF1='Très-Faible':'gaussmf',[1 0]
MF2='Faible':'gaussmf',[1 2.5]
MF3='Normal':'gaussmf',[1 5]
MF4='Forte':'gaussmf',[1 7.5]
MF5='Très-Forte':'gaussmf',[1 10]

[Input2]
Name='Occurrence'
Range=[0 10]
NumMFs=5
MF1='Rare':'gaussmf',[1 0]
MF2='Occasionnelle':'gaussmf',[1 2.5]
MF3='régulière':'gaussmf',[1 5]
MF4='Systématique':'gaussmf',[1 7.5]
MF5='Très-Forte':'gaussmf',[1 10]

[Input3]
Name='Gravité'
Range=[0 10]
NumMFs=5
MF1='Très-Faible':'gaussmf',[1 0]
MF2='Faible':'gaussmf',[1 2.5]
MF3='Normal':'gaussmf',[1 5]
MF4='Grave':'gaussmf',[1 7.5]
MF5='Très-Grave':'gaussmf',[1 10]

[Output1]
```

```
Name='Criticité'
Range=[0 10]
NumMFs=5
MF1='Très-Faible':'gaussmf',[1 0]
MF2='Faible':'gaussmf',[1 2.5]
MF3='Normal':'gaussmf',[1 5]
MF4='Haute':'gaussmf',[1 7.5]
MF5='Très-Haute':'gaussmf',[1 10]
```

```
[Rules]
0 0 5, 5 (1) : 1
5 5 0, 5 (1) : 1
0 5 4, 4 (1) : 1
0 4 4, 4 (1) : 1
0 5 3, 4 (1) : 1
0 4 3, 4 (1) : 1
0 5 2, 3 (1) : 1
0 4 2, 3 (1) : 1
2 4 0, 5 (1) : 1
1 4 0, 5 (1) : 1
0 3 4, 4 (1) : 1
0 5 1, 3 (1) : 1
0 4 1, 3 (1) : 1
0 3 1, 3 (1) : 1
2 3 3, 4 (1) : 1
1 3 3, 4 (1) : 1
2 3 2, 3 (1) : 1
1 3 2, 3 (1) : 1
3 3 3, 3 (1) : 1
0 2 4, 4 (1) : 1
0 2 2, 2 (1) : 1
5 1 1, 1 (1) : 1
4 1 1, 1 (1) : 1
5 2 1, 1 (1) : 1
4 2 1, 1 (1) : 1
5 4 3, 3 (1) : 1
4 4 3, 3 (1) : 1
5 3 2, 3 (1) : 1
4 3 2, 3 (1) : 1
3 3 2, 3 (1) : 1
2 3 2, 2 (1) : 1
1 3 2, 2 (1) : 1
3 3 1, 2 (1) : 1
4 3 1, 3 (1) : 1
5 3 1, 2 (1) : 1
3 2 3, 3 (1) : 1
2 2 3, 3 (1) : 1
1 2 3, 3 (1) : 1
4 2 3, 3 (1) : 1
5 2 3, 3 (1) : 1
3 2 1, 2 (1) : 1
2 2 1, 2 (1) : 1
1 2 1, 2 (1) : 1
0 1 4, 3 (1) : 1
0 1 3, 2 (1) : 1
3 1 2, 2 (1) : 1
2 1 2, 2 (1) : 1
1 1 2, 2 (1) : 1
4 1 2, 2 (1) : 1
5 1 2, 2 (1) : 1
```

3 1 1, 1 (1) : 1  
2 1 1, 1 (1) : 1  
1 1 1, 1 (1) : 1

## Règles

1. Si (Gravité est Très-Grave) Alors (Criticité est Très-Haute)
2. Si (Détection est Très-Forte) et (Occurrence est Très-Forte) Alors (Criticité est Très-Haute)
3. Si (Occurrence est Très-Forte) et (Gravité est Grave) Alors (Criticité est Haute)
4. Si (Occurrence est Systématique) et (Gravité est Grave) Alors (Criticité est Haute)
5. Si (Occurrence est Très-Forte) et (Gravité est Normal) Alors (Criticité est Haute)
6. Si (Occurrence est Systématique) et (Gravité est Normal) Alors (Criticité est Haute)
7. Si (Occurrence est Très-Forte) et (Gravité est Faible) Alors (Criticité est Normal)
8. Si (Occurrence est Systématique) et (Gravité est Faible) Alors (Criticité est Normal)
9. Si (Détection est Faible) et (Occurrence est Systématique) Alors (Criticité est Très-Haute)
10. Si (Détection est Très-Faible) et (Occurrence est Systématique) Alors (Criticité est Très-Haute)
11. Si (Occurrence est régulière) et (Gravité est Grave) Alors (Criticité est Haute)
12. Si (Occurrence est Très-Forte) et (Gravité est Très-Faible) Alors (Criticité est Normal)
13. Si (Occurrence est Systématique) et (Gravité est Très-Faible) Alors (Criticité est Normal)
14. Si (Occurrence est régulière) et (Gravité est Très-Faible) Alors (Criticité est Normal)
15. Si (Détection est Faible) et (Occurrence est régulière) et (Gravité est Normal) Alors (Criticité est Haute)
16. Si (Détection est Très-Faible) et (Occurrence est régulière) et (Gravité est Normal) Alors (Criticité est Haute)
17. Si (Détection est Faible) et (Occurrence est régulière) et (Gravité est Faible) Alors (Criticité est Normal)
18. Si (Détection est Très-Faible) et (Occurrence est régulière) et (Gravité est Faible) Alors (Criticité est Normal)
19. Si (Détection est Normal) et (Occurrence est régulière) et (Gravité est Normal) Alors (Criticité est Normal)
20. Si (Occurrence est Occasionnelle) et (Gravité est Grave) Alors (Criticité est Haute)
21. Si (Occurrence est Occasionnelle) et (Gravité est Faible) Alors (Criticité est Faible)
22. Si (Détection est Très-Forte) et (Occurrence est Rare) et (Gravité est Très-Faible) Alors (Criticité est Très-Faible)
23. Si (Détection est Forte) et (Occurrence est Rare) et (Gravité est Très-Faible) Alors (Criticité est Très-Faible)
24. Si (Détection est Très-Forte) et (Occurrence est Occasionnelle) et (Gravité est Très-Faible) Alors (Criticité est Très-Faible)
25. Si (Détection est Forte) et (Occurrence est Occasionnelle) et (Gravité est Très-Faible) Alors (Criticité est Très-Faible)
26. Si (Détection est Très-Forte) et (Occurrence est Systématique) et (Gravité est Normal) Alors (Criticité est Normal)
27. Si (Détection est Forte) et (Occurrence est Systématique) et (Gravité est Normal) Alors (Criticité est Normal)
28. Si (Détection est Très-Forte) et (Occurrence est régulière) et (Gravité est Faible) Alors (Criticité est Normal)
29. Si (Détection est Forte) et (Occurrence est régulière) et (Gravité est Faible) Alors (Criticité est Normal)
30. Si (Détection est Normal) et (Occurrence est régulière) et (Gravité est Faible) Alors (Criticité est Normal)

31. Si (Détection est Faible) et (Occurrence est régulière) et (Gravité est Faible) Alors (Criticité est Faible)
32. Si (Détection est Très-Faible) et (Occurrence est régulière) et (Gravité est Faible) Alors (Criticité est Faible)
33. Si (Détection est Normal) et (Occurrence est régulière) et (Gravité est Très-Faible) Alors (Criticité est Faible)
34. Si (Détection est Forte) et (Occurrence est régulière) et (Gravité est Très-Faible) Alors (Criticité est Normal)
35. Si (Détection est Très-Forte) et (Occurrence est régulière) et (Gravité est Très-Faible) Alors (Criticité est Faible)
36. Si (Détection est Normal) et (Occurrence est Occasionnelle) et (Gravité est Normal) Alors (Criticité est Normal)
37. Si (Détection est Faible) et (Occurrence est Occasionnelle) et (Gravité est Normal) Alors (Criticité est Normal)
38. Si (Détection est Très-Faible) et (Occurrence est Occasionnelle) et (Gravité est Normal) Alors (Criticité est Normal)
39. Si (Détection est Forte) et (Occurrence est Occasionnelle) et (Gravité est Normal) Alors (Criticité est Normal)
40. Si (Détection est Très-Forte) et (Occurrence est Occasionnelle) et (Gravité est Normal) Alors (Criticité est Normal)
41. Si (Détection est Normal) et (Occurrence est Occasionnelle) et (Gravité est Très-Faible) Alors (Criticité est Faible)
42. Si (Détection est Faible) et (Occurrence est Occasionnelle) et (Gravité est Très-Faible) Alors (Criticité est Faible)
43. Si (Détection est Très-Faible) et (Occurrence est Occasionnelle) et (Gravité est Très-Faible) Alors (Criticité est Faible)
44. Si (Occurrence est Rare) et (Gravité est Grave) Alors (Criticité est Normal)
45. Si (Occurrence est Rare) et (Gravité est Normal) Alors (Criticité est Faible)
46. Si (Détection est Normal) et (Occurrence est Rare) et (Gravité est Faible) Alors (Criticité est Faible)
47. Si (Détection est Faible) et (Occurrence est Rare) et (Gravité est Faible) Alors (Criticité est Faible)
48. Si (Détection est Très-Faible) et (Occurrence est Rare) et (Gravité est Faible) Alors (Criticité est Faible)
49. Si (Détection est Forte) et (Occurrence est Rare) et (Gravité est Faible) Alors (Criticité est Faible)
50. Si (Détection est Très-Forte) et (Occurrence est Rare) et (Gravité est Faible) Alors (Criticité est Faible)
51. Si (Détection est Normal) et (Occurrence est Rare) et (Gravité est Très-Faible) Alors (Criticité est Très-Faible)
52. Si (Détection est Faible) et (Occurrence est Rare) et (Gravité est Très-Faible) Alors (Criticité est Très-Faible)
53. Si (Détection est Très-Faible) et (Occurrence est Rare) et (Gravité est Très-Faible) Alors (Criticité est Très-Faible)

## ANNEXE 10

# MODÈLE À 25 RÈGLES

Pour créer notre modèle flou, nous avons utilisé le Toolbox de Fuzzy Logic du logiciel Matlab<sup>®</sup>, dans ce toolbox nous avons créé un fichier qui contient la définition de la totalité de notre modèle à cinquante-trois règles. Est à dire ce fichier comprend la définition des fonctions d'appartenance, des règles, méthodes d'implication... etc. A continuation le fichier Matlab suivi des règles.

## Fichier Matlab

[System]

Name='Deux\_Variables'  
Type='mamdani'  
Version=2.0  
NumInputs=2  
NumOutputs=1  
NumRules=25  
AndMethod='min'  
OrMethod='max'  
ImpMethod='min'  
AggMethod='max'  
DefuzzMethod='custom\_defuzz'

[Input1]

Name='Occurrence'  
Range=[0 10]  
NumMFs=5  
MF1='Rare': 'gaussmf', [1 0]  
MF2='Occasionnelle': 'gaussmf', [1 2.5]  
MF3='régulière': 'gaussmf', [1 5]  
MF4='Systématique': 'gaussmf', [1 7.5]  
MF5='Très-Forte': 'gaussmf', [1 10]

[Input2]

Name='Gravité'  
Range=[0 10]  
NumMFs=5  
MF1='Très-Faible': 'gaussmf', [1 0]  
MF2='Faible': 'gaussmf', [1 2.5]  
MF3='Normal': 'gaussmf', [1 5]  
MF4='Grave': 'gaussmf', [1 7.5]  
MF5='Très-Grave': 'gaussmf', [1 10]

[Output1]

Name='Criticité'  
Range=[0 10]  
NumMFs=5  
MF1='Très-Faible': 'gaussmf', [1 0]  
MF2='Faible': 'gaussmf', [1 2.5]  
MF3='Normal': 'gaussmf', [1 5]  
MF4='Haute': 'gaussmf', [1 7.5]  
MF5='Très-Haute': 'gaussmf', [1 10]

#### [Rules]

1 1, 1 (1) : 1  
1 2, 2 (1) : 1  
1 3, 2 (1) : 1  
1 4, 3 (1) : 1  
1 5, 5 (1) : 1  
2 1, 2 (1) : 1  
2 2, 2 (1) : 1  
2 3, 3 (1) : 1  
2 4, 3 (1) : 1  
2 5, 5 (1) : 1  
3 1, 2 (1) : 1  
3 2, 3 (1) : 1  
3 3, 3 (1) : 1  
3 4, 4 (1) : 1  
3 5, 5 (1) : 1  
4 1, 3 (1) : 1  
4 2, 3 (1) : 1  
4 3, 4 (1) : 1  
4 4, 4 (1) : 1  
4 5, 5 (1) : 1  
5 1, 4 (1) : 1  
5 2, 4 (1) : 1  
5 3, 4 (1) : 1  
5 4, 5 (1) : 1  
5 5, 5 (1) : 1

#### Règles

1. Si (Occurrence est Rare) et (Gravité est Très-Faible) Alors (Criticité est Très-Faible)
2. Si (Occurrence est Rare) et (Gravité est Faible) Alors (Criticité est Faible)
3. Si (Occurrence est Rare) et (Gravité est Normal) Alors (Criticité est Faible)
4. Si (Occurrence est Rare) et (Gravité est Grave) Alors (Criticité est Normal)
5. Si (Occurrence est Rare) et (Gravité est Très-Grave) Alors (Criticité est Très-Haute)
6. Si (Occurrence est Occasionnelle) et (Gravité est Très-Faible) Alors (Criticité est Faible)
7. Si (Occurrence est Occasionnelle) et (Gravité est Faible) Alors (Criticité est Faible)
8. Si (Occurrence est Occasionnelle) et (Gravité est Normal) Alors (Criticité est Normal)
9. Si (Occurrence est Occasionnelle) et (Gravité est Grave) Alors (Criticité est Normal)
10. Si (Occurrence est Occasionnelle) et (Gravité est Très-Grave) Alors (Criticité est Très-Haute)
11. Si (Occurrence est régulière) et (Gravité est Très-Faible) Alors (Criticité est Faible)
12. Si (Occurrence est régulière) et (Gravité est Faible) Alors (Criticité est Normal)
13. Si (Occurrence est régulière) et (Gravité est Normal) Alors (Criticité est Normal)
14. Si (Occurrence est régulière) et (Gravité est Grave) Alors (Criticité est Haute)
15. Si (Occurrence est régulière) et (Gravité est Très-Grave) Alors (Criticité est Très-Haute)
16. Si (Occurrence est Systématique) et (Gravité est Très-Faible) Alors (Criticité est Normal)
17. Si (Occurrence est Systématique) et (Gravité est Faible) Alors (Criticité est Normal)
18. Si (Occurrence est Systématique) et (Gravité est Normal) Alors (Criticité est Haute)
19. Si (Occurrence est Systématique) et (Gravité est Grave) Alors (Criticité est Haute)
20. Si (Occurrence est Systématique) et (Gravité est Très-Grave) Alors (Criticité est Très-Haute)
21. Si (Occurrence est Très-Forte) et (Gravité est Très-Faible) Alors (Criticité est Haute)
22. Si (Occurrence est Très-Forte) et (Gravité est Faible) Alors (Criticité est Haute)
23. Si (Occurrence est Très-Forte) et (Gravité est Normal) Alors (Criticité est Haute)
24. Si (Occurrence est Très-Forte) et (Gravité est Grave) Alors (Criticité est Très-Haute)
25. Si (Occurrence est Très-Forte) et (Gravité est Très-Grave) Alors (Criticité est Très-Haute)

## RESUME

---

Pour faciliter la maintenance de groupes hydroélectriques et assurer la production en énergie électrique, nous avons défini un outil d'aide à la décision pour la définition de plans de maintenance en intégrant la notion de risques pour une turbine Francis actuellement en activité dans une centrale hydroélectrique en Colombie. La difficulté majeure en gestion des risques est la quantification des risques les uns par rapport aux autres, quantification essentielle pour que les actions de maintenance mises en place assurent à la fois la disponibilité du système et la sécurité de l'ensemble. Les risques étant généralement exprimés en terme de connaissance humaine, il nous a semblé très intéressant d'utiliser la logique floue pour résoudre ce problème. Le travail mené nous a permis de constater que la logique floue se présente comme une méthode très prometteuse. De plus, elle peut aussi bien s'appliquer dans le cas de défaillances détectables (grâce à des capteurs) ou dans un cadre plus difficile à estimer lorsque les défaillances ne sont pas détectables. Ce système d'aide à la décision a été développé à partir des résultats fournis par l'EAFIT, Université partenaire du projet en Colombie.

**Mots clés :** maintenance, évaluation et estimation des risques, logique floue, méthode PERT, turbine FRANCIS.

**Abstract:** To facilitate the maintenance of hydroelectric groups and ensure the production of electrical energy, we defined a decision making tool to help the construction of maintenance plans by integrating the concept of risk for a Francis turbine, currently operating in a hydroelectric power station in Colombia. The major difficulty in risks management is the quantification of a risk and his relations with the others hazards. This quantification is essential for the definition of maintenance actions to ensure the availability and the system security. As the risks are generally expressed in terms of human knowledge, it seems very interesting to use fuzzy logic to solve this kind of problems. Moreover, it can also be applied in case of detectable failures (via sensors) or undetectable failures. This work has been done in collaboration with EAFIT University in Colombia.

**Key-words:** maintenance, risk evaluation and estimation, fuzzy logic, PERT method, FRANCIS turbine.