

# Modélisation de la disponibilité d'une chaîne de GNL sur la base d'une approche bayésienne d'estimation des indices de fiabilité

A. Smati<sup>1</sup>, K. Younsi<sup>1</sup>, N. Zeraibi<sup>1</sup> et N. Zemmour<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Université de Boumerdès, Faculté des hydrocarbures, Département transport et équipement, Boumerdès - Algérie  
e-mail : a\_smati@yahoo.com - karim\_zd@yahoo.fr - no\_zeraibi@yahoo.fr - no\_zemmour@yahoo.fr

**Résumé** — Les usines de gaz naturel liquéfié (GNL) se caractérisent par leur nombre relativement réduit dans le monde, la diversité des procédés technologiques utilisés ainsi que des coûts d'investissement et d'exploitation très élevés. L'autoconsommation de ce type d'unité est de l'ordre de 15 % et peut quasiment doubler dans le cas d'une fréquence importante des arrêts intempestifs ou volontaires dus aux pannes des équipements situés sur tout le parcours de la chaîne GNL. En conséquence, l'amélioration de la fiabilité de la chaîne dans sa globalité se traduirait objectivement par une réduction substantielle des coûts d'énergie. Pour le cas des systèmes réparables, on utilise le plus souvent la disponibilité comme indicateur de fiabilité. Dans cet article, la chaîne GNL est assimilée à un système complexe indissociable. Cependant, la modélisation des systèmes complexes, d'un point de vue fiabilité ou autre, est toujours délicate en raison principalement des dimensions astronomiques de l'espace de phase. Ainsi, une approche de type systémique est mise à profit pour ramener l'espace de phase à des dimensions gérables. Une représentation des sous-systèmes par diagrammes de fiabilité permet alors une estimation plus aisée des probabilités associées à chaque état. Enfin, une démarche *bottom up* autorise la reconstitution du modèle global de disponibilité de la chaîne GNL. En liaison avec la faiblesse manifeste caractérisant le retour d'expérience dans le domaine de la technologie du GNL, une approche d'estimation bayésienne des indices de fiabilité des différents équipements composant la chaîne est mise à profit. Un certain nombre de résultats de l'application de la méthodologie développée à la chaîne Hassi R'mel-Skikda sont fournis.

**Abstract** — *LNG Chain Availability Using Bayesian Estimation of Reliability Rates* — LNG plants are characterized by their relatively low number in the world, diversity of processes involved, very high investment and operating costs. The fuel consumption of this type of facilities (about 15%) may double in given cases, when the frequency of untimely and volunteer shut downs is high. Then, the improvement of the reliability of the LNG chain in its overall will lead objectively to substantial decrease of energy costs. For repairable systems, availability is more often used as reliability indicator. In reliability point of view, the LNG chain must be assimilated to a unique complex system. However, modeling of complex systems, in reliability point of view or other, is always difficult in relation with the large dimensions of the space of phases. In this paper, a systemic approach is used to reduce the space of phases. A representation of sub-systems by reliability diagrams permit a more easy calculation of probabilities associated with every phase. A bottom up technique allows the reconstitution of the global model of reliability of the chain.

*In an environment characterized by its weakness in statistical data, a Bayesian estimation approach is used to define the failure and repair rates of different equipments composing the LNG chain. Some results concerning Algerian LNG chain Hassi R'mel-Skikda are furnished.*

## INTRODUCTION

Les usines de liquéfaction de gaz naturel se caractérisent par [1-5]:

- leur nombre relativement réduit : une vingtaine d'unités à travers le monde dont quatre en Algérie ;
- la diversité des procédés technologiques mis en œuvre ;
- des capacités de production très importantes se chiffrant en milliards de mètres cubes de gaz ;
- des coûts d'investissement et d'exploitation très élevés se répercutant lourdement sur le coût du mètre cube de GNL produit.

Les coûts d'exploitation élevés de ce type d'installation sont principalement dus à la consommation propre des unités de liquéfaction qui, en fonctionnement stable, atteint environ 15 %. L'autoconsommation augmente sensiblement en fonctionnement perturbé. Elle peut même quasiment doubler dans certains cas. Par fonctionnement perturbé, il y a lieu de comprendre ici les arrêts intempestifs et volontaires dus aux pannes des équipements situés sur tout le parcours de la chaîne (fig. 1). Ces perturbations se traduisent en particulier

par un grand nombre d'arrêts/démarrages des trains de liquéfaction et des unités de compression du gazoduc. Des arrêts/démarrages fréquents sont non seulement préjudiciables en termes de fiabilité mais également en termes de surconsommation énergétique. En effet, durant les opérations de démarrage d'un train de liquéfaction, on enregistre des déperditions supplémentaires d'énergie sans production de produits finis. On estime que le seul démarrage d'un train de liquéfaction de l'unité GNL de Skikda se traduit par la perte d'environ 4 millions de thermies. Devant l'importance de ces chiffres, l'amélioration de la fiabilité d'une chaîne de GNL dans sa globalité devient un problème essentiel. L'amélioration de la fiabilité se traduira *ipso facto* par une réduction substantielle des coûts de production. Au-delà des actions de maintenance courante, l'amélioration de la fiabilité peut être obtenue par la réalisation de solutions purement techniques (redondances et stockages souterrains en particulier). Cependant, ces alternatives sont fortement capitalistiques et nécessitent l'élaboration de modèles mathématiques permettant d'évaluer leur impact en vue d'une prise de décision rationnelle. En raison du lien ombilical liant le gazoduc aux unités de liquéfaction,

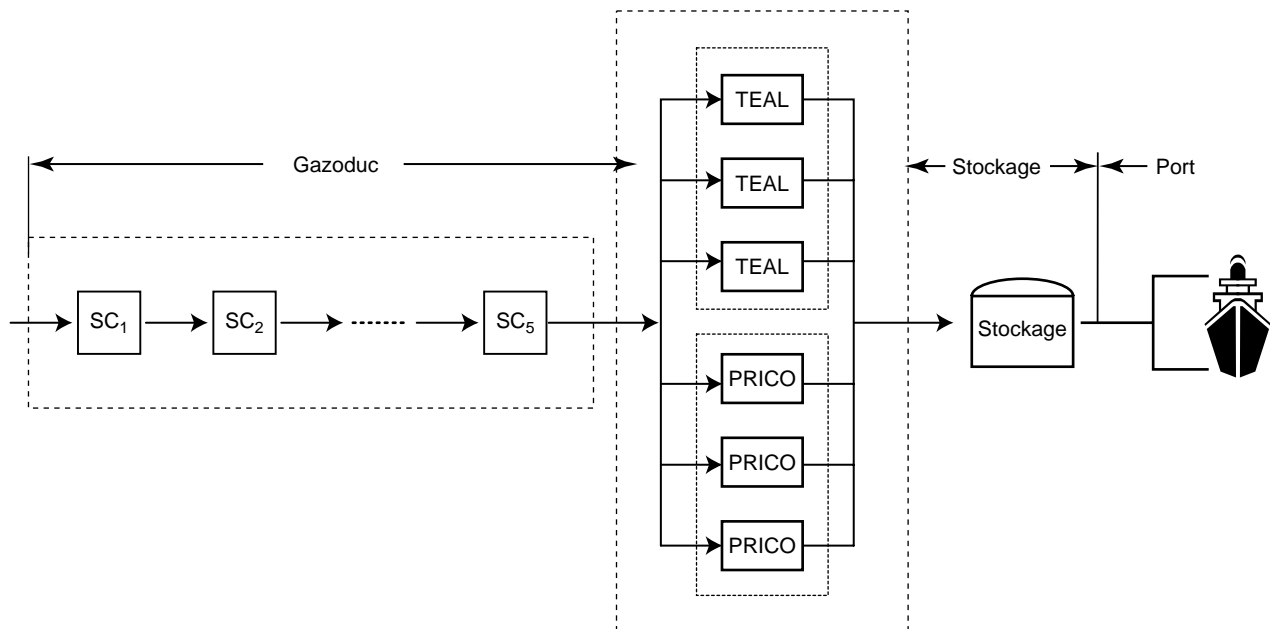


Figure 1

Chaîne GNL Hassi R'mel-Skikda.

The Hassi R'mel-Skikda LNG chain.

une chaîne GNL doit être considérée comme un système complexe indissociable. En effet, une panne survenant sur une station de compression (SC) de gazoduc et se traduisant par une baisse du débit de transit de la canalisation, aura comme conséquence l'arrêt volontaire d'un ou de plusieurs trains de liquéfaction, ou un fonctionnement à charge partielle de l'ensemble de l'unité préjudiciable en termes de rendement [6]. Inversement, une perturbation engendrée par une défaillance au niveau de l'unité de liquéfaction aura également une répercussion directe sur le régime d'exploitation du gazoduc. Ce dernier doit automatiquement s'adapter à un fonctionnement avec un débit réduit se traduisant par l'arrêt volontaire d'un certain nombre de turbocompresseurs (TC), voire de stations complètes. Si l'analyse de la fiabilité des gazoducs a fait l'objet d'un certain nombre de travaux [7-10], en revanche, il y a peu d'articles traitant de la fiabilité des unités GNL et encore moins de la chaîne dans sa globalité [11, 12]. Cependant, les modèles élaborés, quel que soit leur degré de sophistication, ne valent que par la qualité de l'estimation des indices de fiabilité des équipements composant le système. Dans le cas général, l'estimation de ces indices se fait sur la base de données statistiques tirées de l'historique des pannes des différents équipements de l'unité et de leurs durées de réparation. Malheureusement, pour le cas des usines de GNL, la « jeunesse » relative de ce type de technologie, la diversité des procédés mis en œuvre et le nombre réduit de ce type d'installation à travers le monde font que le retour d'expérience est très pauvre. Il y a donc lieu d'explorer de nouvelles approches d'estimation des indices de fiabilité dans un environnement caractérisé par sa faiblesse en données statistiques. Dans ce contexte, la mise à profit des techniques dites d'estimation bayésiennes peut s'avérer très utile [13-15].

## 1 FIABILITE ET DISPONIBILITE

La fiabilité est considérée comme la science des défaillances. Par définition, la fiabilité est « l'aptitude d'un dispositif à accomplir une fonction requise, dans des conditions données, pendant une durée donnée » [16-21]. La fiabilité est quantifiée par l'introduction de différentes grandeurs caractéristiques. Dans la pratique, la fiabilité  $R$  d'un système, dans le cas de systèmes irréparables, s'exprime comme la probabilité que l'unité considérée remplisse sa fonction pendant une durée fixée ou ne tombe pas en panne pendant ce temps. La fiabilité  $R(t)$  du système et la probabilité de défaillance  $F(t)$  sont à cette occasion déterminées à partir du taux de défaillance supposé constant :

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (1)$$

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (2)$$

Dans le cas des systèmes réparables, on utilise la disponibilité comme grandeur caractéristique de fiabilité. La disponibilité représente la probabilité qu'un système se trouve en

service à un moment déterminé  $t$ . Dans la pratique, on entend par disponibilité, la disponibilité à long terme (disponibilité asymptotique). Dans ce contexte, les définitions suivantes sont habituelles [22-24] :

$$A = \frac{MTTF}{MTTF + MTTR} = \frac{\mu}{\mu + \lambda} \quad (3)$$

$$\bar{A} = \frac{MTTR}{MTTR + MTTF} = \frac{\lambda}{\mu + \lambda} \quad (4)$$

avec :

$A$  disponibilité ;

$\bar{A}$  indisponibilité ;

MTTF durée moyenne d'exploitation sans défaut ;

MTTR durée moyenne de défaillance et de réparation ;

$\lambda$  taux de défaillance ;

$\mu$  taux de réparation.

## 2 PROCÉDÉS TECHNIQUES D'AMÉLIORATION DE LA DISPONIBILITÉ D'UNE CHAÎNE GNL

Au-delà des actions de maintenance préventive, l'amélioration de la disponibilité d'un chaîne de GNL peut être obtenue par la réalisation des procédés techniques suivants :

- redondance des TC ;
- redondance des tronçons de canalisation du gazoduc ;
- technique de recyclage à froid au niveau des SC ;
- stockage souterrain de gaz naturel.

Dans le cas général, les SC de gazoduc disposent d'un TC en redondance passive. Le renforcement de la redondance par un deuxième TC de réserve permet théoriquement d'améliorer la fiabilité de l'ouvrage. La redondance des tronçons de canalisation se traduit inmanquablement par un bond significatif de la fiabilité du gazoduc. Malheureusement, cette option ne peut être envisagée uniquement comme alternative pour améliorer la fiabilité du gazoduc en raison des coûts prohibitifs d'une telle opération. La technique dite de « recyclage à froid » [2, 3] est destinée à fournir une plus grande souplesse dans la régulation de la station, mais surtout, permet de réduire substantiellement le nombre d'arrêts/démarrages des TC. Des arrêts/démarrages trop fréquents sont la principale source de baisse de la fiabilité des TC, et par conséquent, d'augmentation des coûts de maintenance. Cette technique, relativement peu onéreuse et facile à mettre en œuvre, est paradoxalement assez peu utilisée dans le transport par gazoduc. On estime qu'un arrêt/démarrage de TC représente l'équivalent de 200 heures de fonctionnement. Des simulations sur certains gazoducs algériens ont montré qu'avec l'usage de cette technique, il serait possible de réduire de moitié le nombre d'arrêts/démarrages. Les stockages intermédiaires restent l'un des procédés les plus efficaces

d'amélioration de la fiabilité de procédés technologiques fonctionnant à flux tendus. Pour le gaz naturel, en raison de la nature compressible de ce type de fluide, la seule alternative raisonnable est le stockage souterrain. Cela consiste sommairement à créer artificiellement une cavité souterraine de grande dimension destinée à recueillir le gaz naturel et, de ce fait, à jouer un rôle régulateur. Concrètement, la réalisation d'un stockage souterrain permettra de briser la dépendance ombilicale qui lie le gazoduc à l'unité GNL. Les progrès technologiques dans ce domaine offrent une large gamme de possibilités. Cependant, deux techniques émergent à l'heure actuelle : le stockage en nappe aquifère et le stockage en cavités salines [25].

### 3 DISPONIBILITÉ OPÉRATIONNELLE ET DISPONIBILITÉ INTRINSÈQUE DES SYSTÈMES DE PRODUCTION

Pour les systèmes de production où les redondances de sous-systèmes sont le plus souvent nombreuses, la panne d'un élément ne provoque pas l'arrêt total de la production mais une chute de performance caractérisée par un flux de matière inférieur au débit nominal. Par débit nominal, il faut comprendre ici la capacité unitaire de production en cas d'absence de pannes. Les sous-systèmes en redondance pouvant avoir des capacités de production différentes, l'ampleur de la chute de performance dépend donc de l'emplacement et de la durée de la panne. La nature intempéste des défaillances entraîne de ce fait une fluctuation aléatoire du débit. Ces fluctuations peuvent alors être probabilisées suivant une loi de distribution statistique ou assimilées à un processus aléatoire à espace de phase discret. Usant d'une représentation de type boîte noire (*fig. 2*) avec, comme variable d'entrée, la capacité de production nominale  $Q_0$  et comme variable de sortie, la capacité réelle de la chaîne GNL  $Q_r$ , la disponibilité peut être assimilée à une fonction de transfert d'un système linéaire et invariant :

$$Q_r = A Q_0 \quad (5)$$

Le processus est soumis à l'influence des défaillances de l'équipement. Celles-ci sont assimilées à des perturbations caractérisées par deux vecteurs, le vecteur des taux de panne  $\vec{\lambda}$  et le vecteur des taux de réparation  $\vec{\mu}$ . Les dimensions de ces vecteurs sont identiques et équivalentes aux nombres d'éléments composant le processus. Pour le cas d'un processus en exploitation, l'identification de  $A$  peut être obtenue par l'usage de données statistiques issues de l'exploitation réelle du processus durant une période de temps  $T$  en usant de la relation suivante :

$$A = \int \frac{Q_r(\tau)}{Q_0} d\tau \quad (6)$$

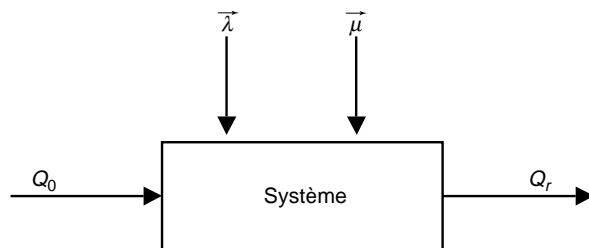


Figure 2

Représentation « boîte noire » de la disponibilité d'un processus.

*Black box representation of availability process.*

Cette dernière relation, très utilisée en pratique, est appelée disponibilité opérationnelle. La disponibilité opérationnelle étant de ce fait un indicateur global, elle ne permet donc pas de situer les maillons faibles ni de mettre à jour le potentiel d'amélioration de la fiabilité du système. Comme  $Q_0$  est une valeur constante, la relation (6) peut également s'écrire comme suit :

$$A = \frac{1}{Q_0} \left[ \frac{1}{T} \int Q_r(\tau) d\tau \right] = \frac{1}{Q_0} M(Q_r) \quad (7)$$

$M(Q_r)$  étant l'espérance mathématique de la variable  $Q_r$ . Or, pour un espace de phase fini, l'espérance mathématique peut également être calculée par l'expression suivante :

$$M(Q_r) = \sum_{k=1}^s P_k Q_k \quad (8)$$

d'où :

$$A = \sum_{k=0}^s \frac{P_k Q_k}{Q_0} \quad (9)$$

avec :

$P_k$  probabilité de l'état de panne ;

$Q_k$  débit de production associé à l'état de panne ;

$Q_0$  débit nominal.

À chaque phase correspond un état de panne bien défini. La disponibilité exprimée par l'intermédiaire de la relation (9) est appelée disponibilité intrinsèque. Par disponibilité intrinsèque, il y a lieu de comprendre la disponibilité définie sur la base d'un modèle mathématique. La disponibilité intrinsèque permet l'estimation de la fiabilité de dispositifs, aussi bien en projet qu'en exploitation. Elle peut s'avérer très utile pour l'aide à la décision concernant l'extension ou l'amélioration des performances de sites existants.

#### 4 LES OBSTACLES DE LA MODÉLISATION DE LA DISPONIBILITÉ INTRINSÈQUE DES SYSTÈMES COMPLEXES

Pour la modélisation de la disponibilité des systèmes complexes, les inconvénients principaux liés à l'usage de la relation (9) tiennent en deux points :

- les dimensions astronomiques de l'espace de phase  $S$  ;
- les difficultés liées à la définition des probabilités de chaque état de phase.

L'usage de la relation (9) passe donc nécessairement par la mise au point d'approches tendant à ramener l'espace de phases  $S$  à des dimensions gérables et à rendre plus aisée l'estimation des probabilités  $P_k$  associées à chaque état de phase. Dans cette optique, la démarche préconisée consiste à :

- mettre en œuvre une approche de type systémique permettant de fractionner hiérarchiquement le système global en sous-systèmes appréhendables [26-30] ;
- représenter chaque sous-système par son diagramme de fiabilité [31] ;
- mettre à profit les modèles de base de la fiabilité des systèmes [31, 32].

#### 5 APPROCHE SYSTÉMIQUE DE LA MODÉLISATION DE LA DISPONIBILITÉ D'UNE CHAÎNE GNL

La modélisation des systèmes complexes, d'un point de vue fiabilité ou autre, est toujours délicate. L'approche systémique, ou approche système, consiste à fractionner le système global en sous-systèmes. Chaque sous-système étant lui-même susceptible d'être décomposé à son tour en sous-systèmes de niveau inférieur. D'une façon générale, un sous-système sera défini comme un ensemble d'éléments (ou de sous-systèmes de niveau inférieur) en interaction. L'élément est considéré comme la base du sous-système en ce sens qu'il ne peut pas être décomposé à son tour en sous-éléments. Cela se traduit par un organigramme hiérarchique ayant un nombre plus ou moins grand de niveaux selon le degré de détail recherché dans la modélisation. Pour la modélisation de la fiabilité d'une chaîne GNL, du type de la chaîne Hassi R'mel Skikda, nous avons adopté une décomposition hiérarchique à cinq niveaux (fig. 3). La démarche de modélisation est de type *bottom up*. À la base, on retrouve les éléments du système. Un élément peut être soit en état de marche, soit en panne. Un élément en bon état de marche peut être soit en fonctionnement, soit en réserve. L'état d'un sous-système peut

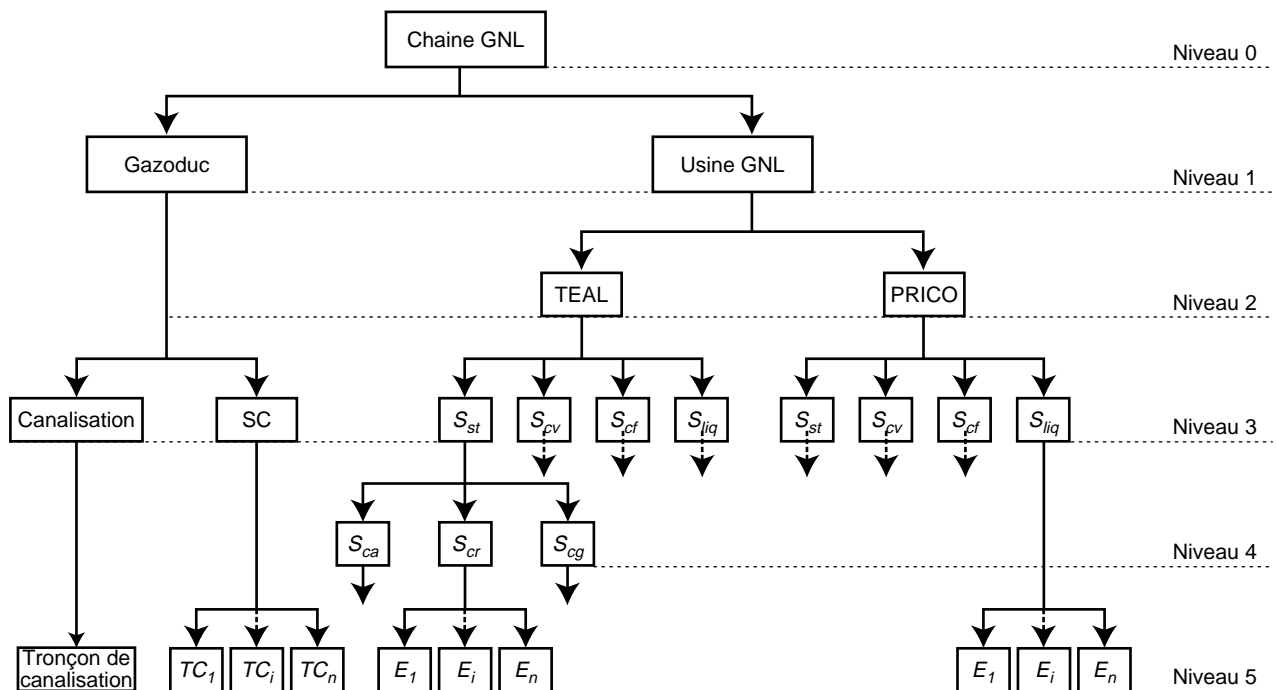


Figure 3

Décomposition systémique de la chaîne GNL Hassi R'mel-Skikda.

$S_{ca}$  : circuit amine,  $S_{cr}$  : circuit régénération ;  $S_{cg}$  : circuit gaz naturel ;

$S_{st}$  : circuit traitement gaz,  $S_{cv}$  : circuit vapeur,  $S_{cf}$  : circuit frigorifique ;

$S_{liq}$  : circuit liquéfaction,  $E_i$  : élément de base du système.

*Systemic decomposition of the Hassi R'mel-Skikda LNG chain.*

alors être caractérisé par la combinaison des états de ses éléments constitutants. De la même manière, l'état d'un sous-système de niveau supérieur peut être défini par la combinaison des états des sous-systèmes de niveau immédiatement inférieur qui le composent.

## 6 REPRÉSENTATION DES SOUS-SYSTÈMES PAR DIAGRAMMES DE FIABILITÉ

Le diagramme de fiabilité est la représentation la plus naturelle de la logique de fonctionnement d'un système ou d'un sous-système (fig. 4). Dans cette représentation, les blocs représentant des éléments (matériels ou événements) dont la défaillance entraîne la panne du système sont placés en série, ceux dont la défaillance ne provoque la panne du système qu'en combinaison avec d'autres blocs sont disposés en parallèle. Le diagramme de fiabilité est donc un graphe sans circuit, admettant une entrée et une sortie, dont les sommets, appelés blocs, représentent les éléments du système et dont les arcs traduisent les relations entre les différents éléments. Le système fonctionne s'il existe un chemin de succès entre l'entrée  $E$  et la sortie  $S$  du diagramme de fiabilité.

## 7 MODÈLES DE BASE DE LA FIABILITÉ DES SYSTÈMES

La connaissance du diagramme de fiabilité du système étudié, sa décomposition en sous-systèmes associés aux modèles de base des dispositions les plus courantes permet dans la majorité des cas de reconstituer le modèle de fiabilité du système global. Les modèles de base sont la représentation mathématique des configurations les plus courantes des

éléments (tableau 1). Un système est considéré comme étant en série d'un point de vue fiabilité s'il tombe en panne lorsqu'un seul ou plusieurs de ses éléments sont défaillants. Le système le plus simple correspondant à ce cas de figure est composé d'un seul élément. Dans le cas d'un système en série à plusieurs éléments, la disponibilité est le produit des disponibilités des éléments constituant le système. Un système est considéré en parallèle d'un point de vue fiabilité si, lorsqu'un ou plusieurs de ses éléments sont défaillants, le système ne tombe pas en panne. Une redondance active est réalisée par la mise en parallèle d'éléments assurant les mêmes fonctions et travaillant en même temps. Un cas particulier de la configuration parallèle, très courant dans les applications technologiques, est fourni par la configuration dite : *redondance active r/n*. Cette configuration est une configuration à redondance active où le système fonctionne si au moins  $r$  éléments parmi les  $n$  fonctionnent. Il existe 2 cas dégénérés :

- pour  $r = 1$ , on retrouve la configuration parallèle classique ;
- pour  $r = n$ , on retrouve la configuration série.

## 8 MODÈLE GLOBAL D'UNE CHAÎNE GNL

Dans le cas général, le gazoduc et l'usine GNL sont assimilés à deux macrosystèmes en série. De ce fait, la disponibilité de la chaîne se calcule comme suit :

$$A_{ch} = A_{gaz} A_{GNL} \quad (10)$$

où :

- $A_{gaz}$  disponibilité du gazoduc ;
- $A_{GNL}$  disponibilité de l'usine GNL.

La réalisation d'un stockage souterrain permet de briser la dépendance ombilicale liant le gazoduc à l'usine GNL, exprimée par la relation (10), en fournissant au système un plus

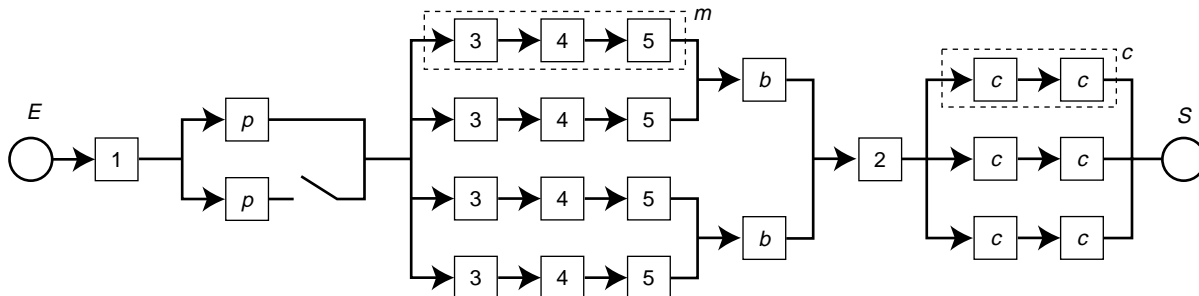



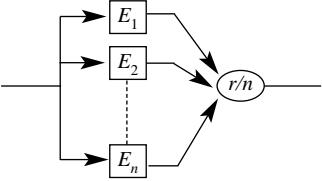
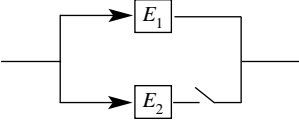
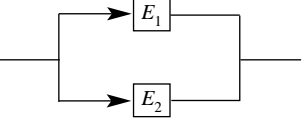
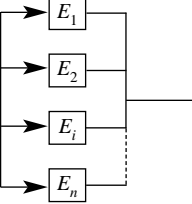
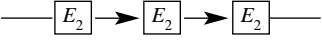
Figure 4

Diagramme de fiabilité du sous-système frigorifique du procédé PRICO.

1, b : ballons séparateurs ; 2 : compresseur axial, p : pompes de réfrigérant ; 3 : échangeurs de réfrigérant ; 4 : vannes Joule-Thomson ; 5 : distributeurs ; c : condenseurs à eau de mer.

Reliability diagram of the PRICO frigorific subsystem.

TABLEAU 1  
 Modèle de base de la disponibilité des systèmes  
*Basis models of the systems availability*

	<p>Élément simple</p>	$A = \frac{\mu}{\lambda + \mu}$
	<p>Redondance r/n</p>	$A_s = \sum_{k=r}^n \frac{C_n^k \mu^k \cdot \lambda^{n-k}}{(\lambda + \mu)^n}$
	<p>Redondance active</p>	$A = \frac{\mu^2 + 2\mu\lambda}{\mu^2 + 2\mu\lambda + \lambda^2}$
	<p>Redondance passive</p>	$A = \frac{2\mu^2 + 2\mu\lambda}{2\mu^2 + 2\mu\lambda + \lambda^2}$
	<p>Système en parallèle à n éléments</p>	$A_s = 1 - \prod_{i=1}^n \left( \frac{\lambda_i}{\mu_i + \lambda_i} \right)$
	<p>Système en série à n éléments</p>	$A_s = \prod_{i=1}^n \frac{\mu_i}{\mu_i + \lambda_i}$

grand nombre de degrés de liberté (fig.5). De ce fait, en raison du principe *qu'une chaîne ne vaut que par son maillon le plus faible*, la disponibilité de la chaîne s'exprime :

$$A_{ch} = \min \{A_{am}, A_{av}\} \quad (11)$$

$A_{am}$  disponibilité du macrosystème amont ;

$A_{av}$  disponibilité du macrosystème aval.

Dans le cas où le stockage est disposé à l'entrée de l'usine GNL, la relation (11) devient :

$$A_{ch} = \min \{A_{gaz}, A_{GNL}\} \quad (12)$$

l'application du modèle global développé pour différentes configurations de la chaîne GNL Hassi R'mel-Skikda figure dans le tableau 2.

### 8.1 Disponibilité de l'usine GNL

Dans le cas général une usine GNL est composée de plusieurs trains de liquéfaction fonctionnant en parallèle.

La disponibilité de chaque train peut être définie par la démarche décrite plus haut. À titre d'exemple, l'application de cette démarche à la modélisation de la disponibilité du procédé de liquéfaction PRICO est détaillée en annexe. Une procédure analogue a été utilisée pour le procédé TEAL (tableau 3). La détermination de la disponibilité des différents trains de liquéfaction constituant l'usine de GNL permet alors de passer au calcul des probabilités de phases correspondant aux différents états de panne  $P_k$ . Ceci est réalisé par l'intermédiaire du théorème des probabilités conditionnelles, associé :

- au théorème particulier des expériences répétées, dans le cas où les trains sont identiques :

$$P_{m,n} = C_n^m \cdot A^{n-m} \cdot (1-A)^m \quad (13)$$

- au théorème général des expériences répétées, dans le cas où les trains sont conçus selon des procédés différents. La fonction génératrice s'exprime alors par la relation suivante [33] :

$$\zeta_n(z) = \prod_{i=1}^n [A_i - (1-A_i)z] \quad (14)$$

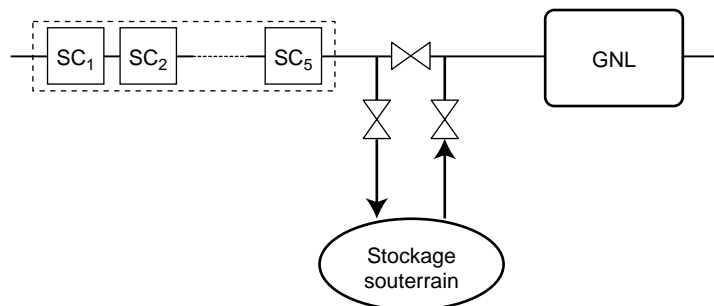


Figure 5

Schéma global d'une chaîne GNL avec stockage souterrain.

*Global scheme of LNG chain with underground storage.*

TABLEAU 2

Disponibilité de la chaîne GNL Hassi R'mel-Skikda pour différentes configurations  
*LNG chain HRM-Skikda availability for different configurations*

Configuration	Disponibilité du gazoduc	Disponibilité de l'usine GNL	Disponibilité de la chaîne GNL	Disponibilité de la chaîne GNL avec stockage souterrain
3 TC + 1	0,9568	0,9309	0,8906	0,9309
3 TC + 2	0,9666	0,9309	0,8998	0,9309
3 TC + 1 avec recyclage à froid	0,9628	0,9309	0,8962	0,9309
Canalisation en redondance	0,99999	0,9309	0,9308	0,9309



TABLEAU 3

Disponibilité des procédés TEAL et PRICO de l'usine GNL Skikda  
*TEAL and PRICO processes availability of Skikda LNG plant*

	PRICO	TEAL
Disponibilité du sous-système circuit frigorifique	0,9962	0,9563
Disponibilité du sous-système circuit vapeur	0,9904	0,9904
Disponibilité du procédé de liquéfaction	0,9888	0,9876
Disponibilité du sous-système traitement gaz	0,9782	0,9804
Disponibilité du procédé	0,9546	0,9170

TABLEAU 4

Disponibilité de l'usine GNL Skikda  
*Skikda LNG plant availability*

États	Situations	$P_k$	$Q_k$ m <sup>3</sup> /j de GNL
0	3 unités $T$ (EBF) + unité $P_{40}$ (EBF) + 2 unités $P$ (EBF)	0,6707	40500
1	1 unité $T$ (panne) + unité $P_{40}$ (EBF) + 2 unités $P$ (EBF)	0,1820	34000
2	Unités $T$ (EBF) + unité $P_{40}$ (panne) + 2 unités $P$ (EBF)	0,0316	34500
3	Unités $T$ (EBF) + unité $P_{40}$ (EBF) + 1 unité $P$ (panne)	0,0632	33000
4	2 unités $T$ (panne) + unité $P_{40}$ (EBF) + 2 unités $P$ (EBF)	0,0164	27500
5	1 unité $T$ (panne) + unité $P_{40}$ (panne) + 2 unités $P$ (EBF)	0,0085	28000
6	Unités $T$ (EBF) + unité $P_{40}$ (panne) + 1 unité $P$ (panne)	0,0029	27000
7	Unités $T$ (EBF) + unité $P_{40}$ (EBF) + 2 unités $P$ (panne)	0,0014	25500
8	3 unités $T$ (panne) + unité $P_{40}$ (EBF) + 2 unités $P$ (EBF)	0,00049	21000
9	2 unités $T$ (panne) + unité $P_{40}$ (panne) + 2 unités $P$ (EBF)	0,00077	21500
10	2 unités $T$ (panne) + unité $P_{40}$ (EBF) + 1 unités $P$ (panne)	0,0015	20000
11	1 unité $T$ (panne) + unité $P_{40}$ (panne) + 1 unités $P$ (panne)	0,0008	20500
12	1 unité $T$ (panne) + unité $P_{40}$ (EBF) + 2 unités $P$ (panne)	0,00039	19000
13	Unités $T$ (EBF) + unité $P_{40}$ (panne) + 2 unités $P$ (panne)	0,00006	19500
14	Tout autres état de panne	0,01929	15000
Disponibilité de l'usine GNL			$A_{GNL} = 0,9309$

où :

- $P_{m,n}$  probabilité d'avoir  $m$  trains en panne parmi les  $n$  trains identiques ;  
 $A$  disponibilité des trains identiques ;  
 $n$  nombre de trains constituant l'usine GNL ;  
 $A_i$  disponibilité du train de liquéfaction  $i$  ;  
 $z$  variable de la fonction génératrice.

Connaissant la capacité de production de chaque train, la disponibilité est alors calculée par la relation (9). Les résultats de calcul pour le cas de l'usine de Skikda sont donnés dans le tableau 4.

## 8.2 Modèle de disponibilité d'un gazoduc

Le gazoduc est examiné sous l'angle d'un macrosystème composé de 3 sous-systèmes de niveau inférieur :

- les tronçons de canalisation ;
- les stations de compression ;
- les sous-systèmes turbocompresseurs.

Alors qu'une défaillance du sous-système de canalisation entraîne l'arrêt complet de la ligne (en cas de fuite par exemple), toute panne sur un autre sous-système ne provoque qu'une diminution du débit de gaz. L'ampleur de cette chute de performance est directement liée à la nature

de la défaillance et à son emplacement. La perte de performances due aux pannes de l'équipement peut alors être quantifiée en usant de la relation (9). Pour cela, il y a lieu de définir :

- toutes les probabilités de phases  $P_k$  ;
- les débits de phases leur correspondant  $Q_k$ .

En raison des dimensions plus réduites du gazoduc, le calcul des probabilités de phase  $P_k$  se fera directement par l'intermédiaire des indices de fiabilité de ses principaux éléments sans passer préalablement, comme pour le cas des unités GNL, par le calcul de la disponibilité des sous-systèmes. Les indices de fiabilité des éléments constitutifs d'un gazoduc sont :

- le taux de défaillance des TC  $\lambda_{TC}$ , des SC  $\lambda_{SC}$ , et de la conduite  $\lambda_L$  ;
- le taux de réparation de chaque élément  $\mu_{TC}$ ,  $\mu_{SC}$  et  $\mu_L$ .

La probabilité que la canalisation dans sa totalité soit en état de bon fonctionnement (EBF) est déterminée par l'intermédiaire de la relation suivante :

$$P_C = \frac{\mu_L}{N+1} \frac{1}{\mu_L + \lambda_L \sum_{i=1}^N L_i} \quad (15)$$

$L_i$  longueur des tronçons en km.

Si toutes les SC d'un gazoduc sont identiques, en utilisant la structure dite de « k parmi n éléments indépendants », la probabilité d'avoir simultanément k SC hors service se calcule par la relation :

$$q_k = \frac{C_n^k \cdot \lambda_{SC}^k \cdot \mu_{SC}^{n-k}}{(\lambda_{SC} + \mu_{SC})^n} \quad (16)$$

Pour une SC composée de m TC principaux et de l TC de réserve, en posant :

$$\gamma = \frac{\lambda_{TC}}{\mu_{TC}} \quad (17)$$

les différentes situations de panne, ou plus exactement leurs probabilités sont calculées à l'aide du modèle suivant [9, 34] :

- Probabilité que les m TC principaux et les l TC de réserve soient tous disponibles :

$$\pi_0 = \frac{1}{\sum_{k=0}^l m^k \frac{\gamma^k}{k!} + m^l \sum_{k=l+1}^{m+l} \frac{\gamma^k}{k!} \prod_{s=0}^{k-l-1} (m-s)} \quad (18)$$

- Probabilité que parmi les m+l TC il y ait k TC défaillants :

$$\pi_k = \begin{cases} \frac{\gamma^k}{k!} \pi_0 & \text{si } k \leq l \\ m^l \frac{\gamma^k}{k!} \prod_{s=0}^{k-l-1} (m-s) \pi_0 & \text{si } k > l \end{cases} \quad (19)$$

- Probabilité d'avoir m TC disponibles dans la station :

$$P_0 = \sum_{k=0}^l m^k \frac{\gamma^k}{k!} \pi_0 \quad (20)$$

- Probabilité d'avoir m-j TC disponibles dans la station :

$$P_j = m^l \frac{\gamma^{l+j}}{(l+j)!} \prod_{s=0}^{j-1} (m-s) \pi_0 \quad (21)$$

Pour des gazoducs de faible ou moyenne longueur tels que les gazoducs algériens, il s'avère peu probable de voir se produire une panne simultanée de plus d'un élément. La probabilité de chaque événement est calculée sur la base des probabilités élémentaires en usant des théorèmes fondamentaux de la théorie des probabilités. Définissant les événements statistiquement significatifs suivants et les probabilités qui leurs correspondent :

$E_0$  canalisation EBF + toutes les SC EBF + m TC dans chaque station EBF ;

$$P(E_0) = P_c q_0 P_0^N \quad (22)$$

$E_{1i}$  canalisation EBF + toutes les SC EBF + 1 TC en panne dans la station i ;

$$P(E_{1i}) = P_c q_0 P_1 P_0^{N-1} \quad i = 1 \div N \quad (23)$$

$E_{2j}$  canalisation EBF + station j en panne + m TC dans chaque station EBF ;

$$P(E_{2j}) = P_c q_1 P_0^{N-1} \quad j = 1 \div N \quad (24)$$

$E_3$  canalisation indisponible ;

$$P(E_3) = 1 - P_c \quad (25)$$

$E_4$  tout autre état de panne ;

$$P(E_4) = 1 - \sum_{k=0}^3 P(E_k) \quad (26)$$

TABLEAU 5  
Disponibilité du gazoduc GK1 Hassi R'mel-Skikda  
*Availability of Hassi R'mel-Skikda gas pipeline*

États	Situations	Probabilité $P_k$	Débit $Q_k$ (Mm <sup>3</sup> /h)
0	Arrêt complet du gazoduc	0,001912	0
1	Ligne GK1 (EBF) + SC (EBF) + 3TC (EBF)	0,871050	1,7
2	Ligne GK1 (EBF) + SC1 (panne) + 3TC (EBF)	0,013879	1,1
3	Ligne GK1 (EBF) + SC2 (panne) + 3TC (EBF)	0,013879	1,08
4	Ligne GK1 (EBF) + SC3 (panne) + 3TC (EBF)	0,013879	1,12
5	Ligne GK1 (EBF) + SC4 (panne) + 3TC (EBF)	0,013879	1,17
6	Ligne GK1 (EBF) + SC5 (panne) + 3TC (EBF)	0,013879	1
7	Ligne GK1 (EBF) + SC (EBF) + 1TC à SC1 (panne)	0,000557	1,5
8	Ligne GK1 (EBF) + SC (EBF) + 1TC à SC2 (panne)	0,000557	1,5
9	Ligne GK1 (EBF) + SC (EBF) + 1TC à SC3 (panne)	0,000557	1,5
10	Ligne GK1 (EBF) + SC (EBF) + 1TC à SC4 (panne)	0,000557	1,5
11	Ligne GK1 (EBF) + SC (EBF) + 1TC à SC5 (panne)	0,000557	1,5
12	Tout autre état de panne	0,054858	1,2
Disponibilité du gazoduc			$A_{gaz} = 0,9568$

Ce modèle permet de quantifier l'impact de toute décision tendant à augmenter la fiabilité du gazoduc sur la valeur maximale du flux de la ligne. À chaque état  $E_K$  doit correspondre un débit  $Q_K$ . Ce débit peut être déterminé en usant des relations hydrauliques décrivant l'écoulement stationnaire du gaz dans une canalisation associées aux caractéristiques de performance des TC [35, 36]. Cependant, la valeur de  $Q_K$  n'est pas univoque. Autrement dit, dans les conditions de l'état  $E_K$ , différentes valeurs de débit peuvent être réalisées. De la relation (9) il apparaît tout l'intérêt de choisir parmi tous les débits possibles celui correspondant à la valeur maximale de  $Q_K$ . Ce dernier peut être déterminé par l'usage d'un modèle d'optimisation usant d'un critère de maximisation du débit [37, 38]. Les résultats d'application sur le gazoduc alimentant l'usine GNL de Skikda sont fournis dans le tableau 5.

## 9 ESTIMATION DES INDICES DE FIABILITÉ

### 9.1 Approche objective et approche subjective de l'estimation

Les modèles développés plus haut ne valent que par la qualité de l'estimation des indices de fiabilité des différents équipements de base. Les indices de fiabilité ne sont rien d'autre que des probabilités. En conséquence, leur estimation, pour chaque cas concret et selon la nature et la qualité des données

disponibles, peut se faire suivant une approche objective ou subjective [14, 15]. Le choix de l'une ou de l'autre de ces tendances passe par :

- l'analyse qualitative et quantitative des données disponibles sur site relatives aux pannes des équipements et de leur durée de réparation ;
- la richesse du retour d'expérience provenant de sites technologiques équivalents et de bases de données internationales ;
- la disponibilité d'informations issues de jugements d'experts.

L'approche objective de l'estimation des indices de fiabilité, représentée principalement par l'approche dite fréquentiste, qui, sur la base de la loi forte des grands nombres, définit la probabilité comme la limite de la fréquence relative des observations faites au cours d'épreuves identiques et indépendantes, par rapport au nombre total des cas supposés tous également possibles, lorsque le nombre d'épreuves tend symboliquement vers l'infini. Si l'on suppose l'apparition d'une panne comme un événement indépendant, la superposition d'un grand nombre d'événements conduit le plus souvent à des flots poissonniens pour lesquels la durée entre deux événements successifs obéit à une loi exponentielle. La loi exponentielle jouit de la remarquable propriété d'absence de mémoire et c'est la seule loi à taux de défaillance constant. Considérant un jeu de variables aléatoires  $t_1, t_2, \dots, t_k$  représentant les temps de bon fonctionnement (TBF) observés

d'un équipement donné. Le MTBF et le taux de panne peuvent être estimés par les relations suivantes :

$$\text{MTBF} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k t_i \quad (27)$$

$$\lambda = \frac{1}{\text{MTBF}} \quad (28)$$

où  $k$  est le nombre total de pannes se produisant durant la période de fonctionnement effective  $T_f$ . Le même raisonnement peut également être appliqué à la durée moyenne de réparation :

$$\text{MTTR} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \tau_i \quad (29)$$

$$\mu = \frac{1}{\text{MTTR}} \quad (30)$$

avec :

$\tau_i$  durée de la réparation après apparition de la panne  $i$  ;  
 $\mu$  taux moyen de réparation.

L'usage de l'approche fréquentiste en fiabilité se heurte à la disponibilité en nombre suffisant de données expérimentales. Pour certains types de matériel on a recours aux essais pour contrer cet handicap. Cette option, très utilisée dans le domaine de l'électronique et pour les équipements de petit gabarit, n'est pas raisonnablement envisageable pour de gros équipements d'installations pétrolières et gazières. De ce fait, on procède généralement à l'amalgame de données récupérées sur des installations technologiques de conceptions plus ou moins identiques, évoluant dans des conditions d'environnement et d'exploitation variables et mises en service à des dates, voire des époques, différentes. Il en découle que :

- les données traitées ne sont pas réunies selon des plans d'échantillonnage standard ;
- les résultats de retour d'expérience sont pollués par des conditions d'exploitation variables et des politiques de maintenances différentes.

La probabilité d'un événement n'est pas une entité directement observable. Dans la démarche objective, on l'assimile à la notion de fréquence relative. Il faudrait donc formellement disposer d'un très grand nombre d'épreuves aléatoires identiques et indépendantes pour que la fréquence des événements tende vers leur probabilité. L'approche subjective a été développée pour généraliser le concept de probabilités aux événements rares répondant difficilement à la notion de fréquence. Elle est représentée principalement par l'approche dite bayésienne qui consiste sommairement à introduire des jugements de type heuristique dans l'évaluation de la probabilité d'une proposition donnée. Cette approche consiste à modéliser l'incertitude que l'on a sur l'occurrence d'un événement, partant d'une valeur de probabilité subjective évaluée *a priori*, sur la base d'informations disponibles, puis

de déduire une probabilité *a posteriori* corrigée par les informations nouvellement acquises. L'information disponible, susceptible d'être utilisée *a priori*, peut revêtir différentes formes. En la trouve en particulier sous deux aspects :

- des valeurs numériques moyennes fournies par les bases de données pour chaque type d'équipement ;
- de jugements d'experts exprimés sous forme d'intervalle encadrant une valeur moyenne.

## 9.2 Estimation des indices de fiabilité par inférence bayésienne

Le théorème de Bayes est une conséquence simple des axiomes et de la définition des probabilités conditionnelles. En conséquence, il serait possible de l'utiliser pour évaluer les probabilités subjectives en tenant compte à la fois de l'estimation *a priori* de ces probabilités et de leur validation par le retour d'expérience (fig. 6). Martz et Waller ont développé une approche permettant d'utiliser les jugements d'experts, fournis sous forme d'intervalles associés à un taux de confiance, comme information *a priori* [13, 14]. L'intégration de données issues des bases de données à une telle démarche permettrait de renforcer considérablement la qualité de l'estimation [39]. Les résultats disponibles au niveau des banques de données, fournis sous forme de valeurs moyennes du taux de panne et du temps de réparation, représentent une synthèse d'un large retour d'expérience d'équipements identiques à travers le monde. La simulation de Monte Carlo permet de transformer ces valeurs ponctuelles en expériences artificielles. Le nombre d'expériences générées est alors pratiquement illimité. L'amalgame des résultats générés artificiellement et des résultats d'observation sur site permet de constituer un échantillon de variables aléatoires  $t_1, t_2, \dots, t_k, t_{k+1}, \dots, t_{k+n}$  suffisamment riche. Considérant maintenant un événement  $H(t + \theta_0)$  de probabilité non nulle et un ensemble d'événements complets  $H_i$ , la probabilité conditionnelle pour que l'ensemble d'événements  $H_i$  se produise, sachant que l'événement  $E$  s'est déjà réalisé, est :

$$P(H_i/E) = \frac{P(E/H_i) \cdot P(H_i)}{\sum_i P(E/H_i) \cdot P(H_i)} \quad (31)$$

Si l'on admet que :

- le jeu obtenu de variables aléatoires  $t_1, t_2, \dots, t_k, t_{k+1}, \dots, t_{k+n}$  est distribué selon une loi  $f(t_i/\lambda)$  de paramètre  $\lambda$  inconnu ;
- la probabilité *a priori* de  $\lambda$  est elle-même distribuée suivant  $g(\lambda)$  ;

alors, le théorème de Bayes s'écrit :

$$h(\lambda/t_1, t_2, \dots, t_n) = \frac{f(t_1/\lambda) \dots f(t_n/\lambda) \cdot g(\lambda)}{\sum_{\lambda} f(t_1/\lambda) \dots f(t_n/\lambda) \cdot g(\lambda)} \quad (32)$$

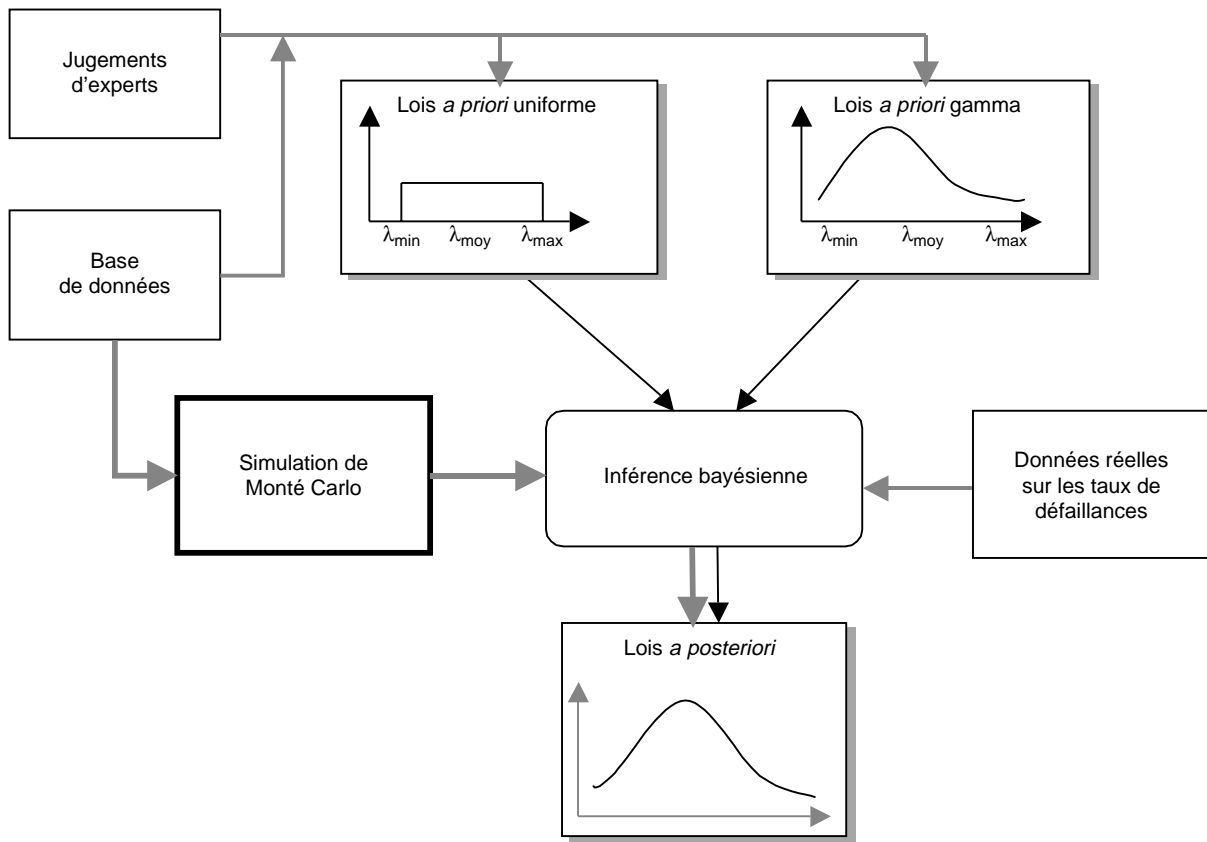


Figure 6  
Principe de l'estimation bayésienne des indices de fiabilité.  
Princip of Bayesian estimation of reliability rates.

Or :

$$f(t_1/\lambda) \cdot f(t_2/\lambda) \dots f(t_n/\lambda) \equiv L(t_1, t_2, \dots, t_n/\lambda) \quad (33)$$

$L(t_1, t_2, \dots, t_n/\lambda)$  étant la fonction de vraisemblance de l'échantillon, on peut donc écrire :

$$h(\lambda/t_1, t_2, \dots, t_n) \propto L(t_1, t_2, \dots, t_n/\lambda) \cdot g(\lambda) \quad (34)$$

$g(\lambda)$ , probabilité *a priori* de  $\lambda$  émise avant d'avoir observé les informations  $T$ , représente le degré de croyance que l'on a sur le paramètre  $\lambda$  avant les observations ;

$h(\lambda/t_1, t_2, \dots, t_n)$  probabilité *a posteriori* de  $\lambda$ , les observations ayant été faites.

$\alpha$  symbole de proportionnalité.

Dans le cas où les variables  $t_1, t_2, \dots, t_n$  représentent un échantillon de données issues d'une distribution dont la fonction de vraisemblance est caractérisée par un paramètre

inconnu  $\lambda$ , de densité de probabilité *a priori*  $g(\lambda)$ , la densité de probabilité *a posteriori* sera :

$$h(\lambda/t_1, t_2, \dots, t_n) = \frac{L(t_1, t_2, \dots, t_n/\lambda)g(\lambda)}{\int_{\Omega} L(t_1, t_2, \dots, t_n/\lambda)g(\lambda)d\lambda} \quad (35)$$

Considérant un test de durée de vie effectué sur  $n$  matériels, supposons qu'au temps  $t_k$  on ait observé  $k$  défaillances et qu'il reste  $n - k$  matériels survivants. Les temps de défaillance étant indépendants, si leur densité de probabilité est  $f(t)$ , l'estimateur du maximum de vraisemblance s'exprime :

$$L(y) = \left[ \prod_{i=1}^k f(t_i) \right] \left[ \prod_{i=k+1}^n (1 - F(t_i^*)) \right] \quad (36)$$

où  $F(t_i^*)$ , probabilité de survie des matériels non défaillants.

L'expression (36) est valable pour toute forme de distribution des temps de défaillance. Si l'on admet que les pannes

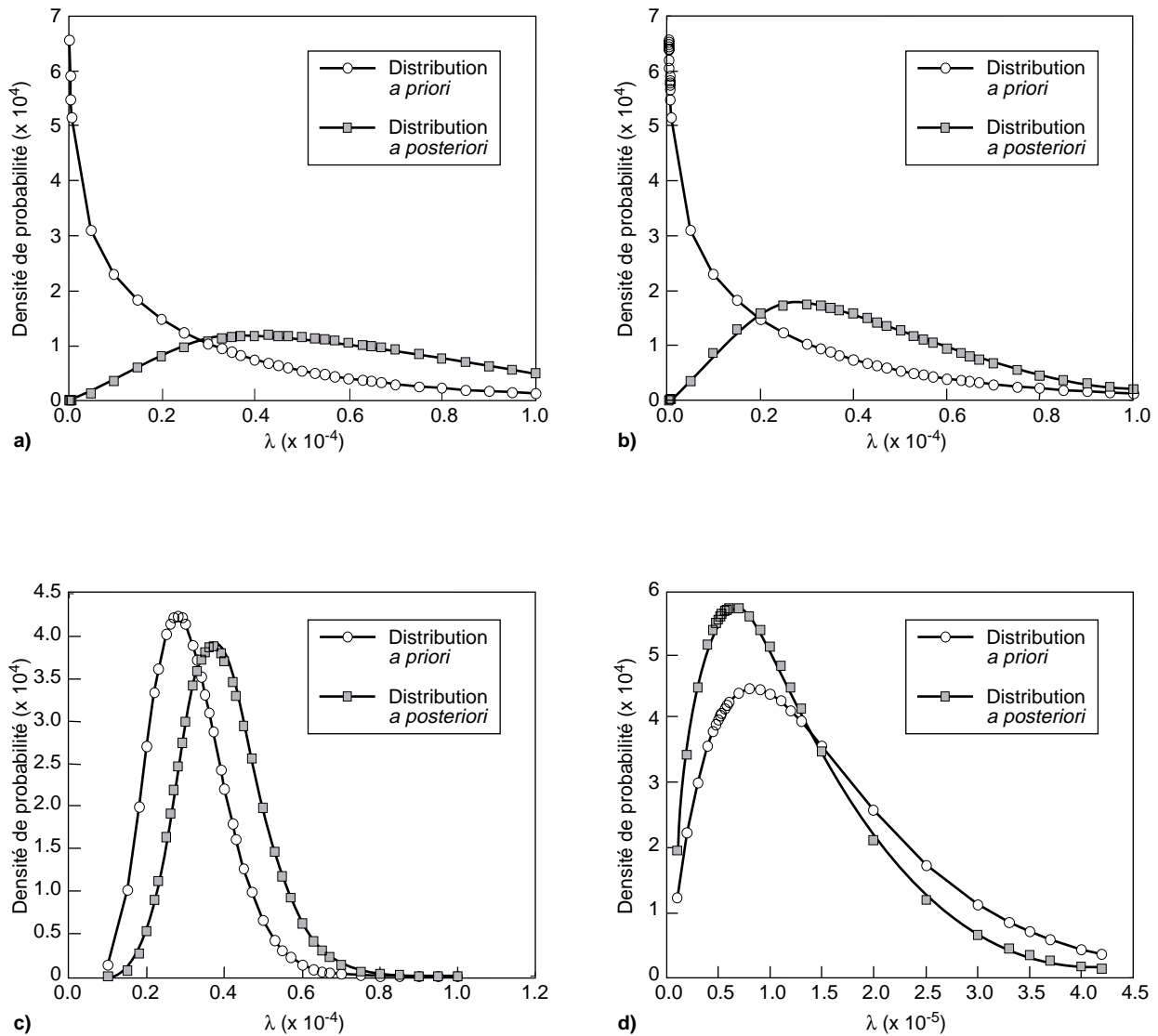


Figure 7

Distributions *a priori* et *a posteriori* des taux de défaillance.

(a) boîte froide ; (b) échangeur bobiné ; (c) pompe cryogénique ; (d) vanne cryogénique.

*A priori and a posteriori distribution of failure rates.*

obéissent à des flots poissonniens, la distribution des temps de défaillance suit une loi exponentielle. La relation (36) permet alors d'évaluer l'estimateur du maximum de vraisemblance du taux de défaillance à partir des observations faites :

$$L(\lambda/y) = \lambda^k \exp(-\lambda) \left[ \sum_{i=1}^k t_i + \sum_{i=k+1}^n t_i^* \right] \quad (37)$$

Si  $f(\lambda)$  est la densité de probabilité *a priori* du taux de défaillance, l'évaluation *a posteriori* de la densité de probabilité est donnée par la relation :

$$f(\lambda/t, k) = \frac{\lambda^k \exp(-\lambda t) f(\lambda)}{\int_0^{\infty} \lambda^k \exp(-\lambda t) d\lambda} \quad (38)$$

En adoptant l'hypothèse d'une loi *a priori* gamma de densité de probabilité :

$$f(\lambda, \beta_0, \theta_0) = \frac{\theta_0^{\beta_0}}{\Gamma(\beta_0)} \lambda^{\beta_0-1} \exp(-\lambda \theta_0) \quad (39)$$

Le choix d'une distribution *a priori* gamma est justifié par la grande diversité de ses représentations. Ainsi, la loi exponentielle représente un cas particulier de la famille des lois gamma. De plus, cette loi étant conjuguée à la loi exponentielle, elle permet de s'affranchir du calcul numérique, nécessaire pour toute autre loi hormis la loi uniforme, pour l'intégration du dénominateur de la relation (38). Il résulte que lorsqu'on observe  $k$  défaillances après un temps cumulé  $t$ , la densité de probabilité *a posteriori* du taux de défaillance s'exprime :

$$f(\lambda/k, \beta_0, \theta_0) = \frac{\lambda^{k+\beta_0-1} \exp[-(t+\theta_0)\lambda]}{\int_0^\infty \lambda^{k+\beta_0-1} \exp[-(t+\theta_0)\lambda] d\lambda} \quad (40)$$

En opérant un changement de variable de la forme :

$$y = k(t + \theta_0) \quad (41)$$

la probabilité *a posteriori* de  $\Lambda$  :

$$g(\Lambda/k, \beta_0, \theta_0) = \frac{(t + \theta_0)^{k+\beta_0}}{\Gamma(k + \beta_0)} \lambda^{k+\beta_0-1} \exp[-(t + \theta_0)\lambda] \quad (42)$$

qui n'est autre qu'une loi gamma de paramètres  $(k + \beta_0)$  et  $(t + \theta_0)$ . Un estimateur ponctuel de cette distribution est l'espérance mathématique :

$$E(\lambda) = \frac{\beta_0 + k}{\theta_0 + t} \quad (43)$$

Les résultats d'application de l'algorithme à l'estimation du taux de panne d'un certain nombre d'équipements de l'unité GNL de Skikda sont donnés dans la figure 7.

## CONCLUSION

Une chaîne GNL est un système complexe. Les coûts d'exploitation élevés des chaînes augmentent très significativement en présence de pannes intempestives de l'équipement. La nécessité d'assurer la sécurité des approvisionnements et la réduction des coûts d'exploitation passe par une analyse de la fiabilité de la chaîne dans sa globalité. Les complexités liées à la modélisation sont traitées par une démarche de type systémique permettant de décomposer le système en sous-systèmes appréhendables, susceptibles d'être abordés sous l'angle d'une représentation par diagrammes de fiabilité.

L'estimation des indices de fiabilité des équipements est réalisée par amalgame de données issues du retour d'expérience, de jugements d'experts et de bases de données en vue de tirer la meilleure qualité d'estimation. L'estimation bayésienne représente une réponse adéquate au problème crucial de la faiblesse du retour d'expérience. Le modèle global proposé dans cet article permet l'estimation de la disponibilité, l'analyse des risques de perturbations, ainsi que la mise au point d'outils d'aide à la décision permettant de rationaliser la conception et l'exploitation de ce type de système. Le modèle peut également servir de support à une organisation efficace de la maintenance préventive, l'optimisation des redondances, le choix optimal des systèmes de liquéfaction, la localisation et le dimensionnement stockage souterrain, etc. La démarche développée, dans son aspect modélisation et estimation, peut être étendue à tout système complexe de l'industrie des hydrocarbures ou autre.

## RÉFÉRENCES

- 1 Finn, A.J., Johnson, G.L., et Tomlinson, T.R. (1999) Developments in natural gas liquefaction. *Hydrocarbon Processing*, 47-58.
- 2 Smati, A., Younsi, K. et Ainouche, A. (2002) Algerian LNG chain reliability modeling using systemic approach and bayesian inference. *Proc. GTI, First Annual Conference and Exhibition on Natural Gas Technologies*, Orlando, Florida.
- 3 Younsi, K., Smati, A. et Ainouche, A. (2001) Modélisation de la fiabilité d'une chaîne GNL. *Actes conf. int. sur la productique*, Sheraton, Alger.
- 4 Younsi, K., Smati, A. et Ainouche, A. (2000) Reliability analysis of refrigeration systems used in liquefied natural gas production. *Proc. Arab-african Conf. on Refrigeration and Air conditioning*, Cairo.
- 5 Vidal, J. (1997) *Thermodynamique, application au génie chimique et à l'industrie pétrolière*, Édition Technip, Paris.
- 6 Ainouche et A. et Smati, A. (2002) Optimization of LNG chain by stochastic dynamic programming model. *Proc. 17<sup>th</sup> World Petroleum Congress*, Rio de Janeiro.
- 7 Seligman, B.J. (1999) Reliability of large-diameter gas pipelines in northern Russia. *Petroleum Economist*, 66, 2, 26-29.
- 8 Smati, A. (1994) Détection de défauts sur un gazoduc. *Rev. Gaz d'aujourd'hui*, 791-794.
- 9 Yacin, E.M. et Berezine, V.L. (1972) *Nadiojnost troubovprovodov*, Nedra, Moscow (en russe).
- 10 Younsi, K. et Smati, A. (2000) Fiabilité d'un gazoduc dans un environnement faible en données statistiques. *Actes du 1<sup>er</sup> Symp. Int. Hydrocarbures*, Boumerdès, Algérie.
- 11 Ainouche, A., Smati, A. et Younsi, K. (2002) Reliability of LNG and natural gas transmission chain. *Proc. 17<sup>th</sup> World Petroleum Congress*, Rio de Janeiro.
- 12 Younsi, K. (2002) Modélisation de la fiabilité d'une chaîne GNL dans un environnement faible en données statistiques. *Thèse de magister*, université de Boumerdès.
- 13 Martz, H.F. et Waller, R.A. (1976) The basics of bayesian reliability. Estimation from attribute test data. *Los Alamos Scientific Laboratory Report LA 6126*.
- 14 Procaccia, H. et Piepszownik, L. (1992) *Fiabilité des équipements et théorie de la décision statistique fréquentielle et bayésienne*, Eyrolles, Paris.

- 15 Lannoy, A. et Procaccia, H. (1994) *Méthodes avancées d'analyse des bases de données de retour d'expérience industriel*, Eyrolles, Paris.
- 16 Aissani, A. (1992) *Modèles stochastiques de la théorie de la fiabilité*, OPU, Alger.
- 17 Aupied, J. (1994) *Retour d'expérience appliqué à la sûreté de fonctionnement des matériels en exploitation*, Eyrolles, Paris.
- 18 Gnedenko, B.V. et Beliaev, Y.K. (1972) *Méthodes mathématiques en fiabilité*, Mir, Moscou.
- 19 Kaufman, A., Grouchko, D. et Cruon, R. (1975) *Modèles mathématiques en théorie de la fiabilité*, Masson.
- 20 Ligeron, J.C. et Lyonnet, P. (1992) *La fiabilité en exploitation*, Lavoisier, Paris.
- 21 Pages, A., Gondran, M. (1980) *Fiabilité des systèmes*, Eyrolles, Paris.
- 22 Bradt, D. (1997) Use reliability, availability and maintainability techniques to optimize system operation. *Hydrocarbon Processing*, 63-65.
- 23 Lyonnet, P. (1992) *La maintenance mathématiques & méthodes. Technique & documentation*, Lavoisier, Paris.
- 24 Ainouche, A. et Smati, A. (2000) Global optimization of the Algerian gas pipeline network. *Proc. 16<sup>th</sup> WPC*, Calgary, Canada.
- 25 Choquel, A. (1996) Le stockage de gaz naturel. *Revue de l'IFP*, **51**, 5, 677-689.
- 26 Smati, A. (1994) Systemic approach in optimization of the Algerian crude oil network. *Proc. AMSE'94*, Lyon.
- 27 Smati, A. (1995) Principes systémiques d'optimisation des systèmes complexes. *Actes 1<sup>ère</sup> JST de l'INHC*, Boumerdès, Algérie.
- 28 Mesarovic, M.D., Macko, D. et Takahara Y. (1970) *Theory of Hierarchical Multilevel Systems*, Academic Press, New York.
- 29 Le Gallou, F. et Bouchon-Meunier, B. (1992) *Systémique, théorie et applications*, Lavoisier.
- 30 Le Moigne, J.L. (1990) *La modélisation des systèmes complexes*, Dunod.
- 31 Michaelis, P. (1988) Fiabilité générale en fonction des composants, Évaluation méthodologique des risques en raffinerie. *Pétrole et techniques*, **341**, 37-47.
- 32 Barlow, R.E. et Proshan, F. (1965) *Mathematical Theory of Reliability*, Wiley, New York.
- 33 Ventsel, H. (1973) *Théorie des probabilités*, Mir, Moscou.
- 34 Smati, A., Zeraibi, N. et Touabti, M.C. (2000) Optimisation du réseau algérien de transport de brut et de condensat. *Oil & Gas Science and Technology - Rev. de l'IFP*, **55**, 5, 543-562.
- 35 Vincent-Genod, J. (1970) *Le transport des hydrocarbures liquides et gazeux par canalisation*, Éditions Technip.
- 36 Pascal, H. (1972) *Écoulement non permanent dans les gazoducs*, Éditions Technip.
- 37 Smati A. et Djelloul A. (1994) Optimisation des régimes de fonctionnement d'un oléoduc sur la base d'un modèle linéaire de régression, *Revue de l'IFP*, **49**, 1, 73-82
- 38 Smati A. (2000), Optimisation multicritère des régimes d'exploitation d'un gazoduc. *Actes du 1<sup>er</sup> symp. int. hydrocarbures*, Boumerdès, Algérie.
- 39 Bloch, H.P. et Geitner, F.K. (1999) Use equipment failure statistics properly. *Hydrocarbon Processing*, 49-53.

Manuscrit définitif reçu en juillet 2003



## ANNEXE

MODÉLISATION DE LA DISPONIBILITÉ  
DU PROCÉDÉ PRICO

## A.1 Description sommaire du procédé PRICO

Le procédé PRICO est un procédé de liquéfaction de gaz naturel développé en 1974 par *Pritchard-Rhodes* et qui utilise un seul fluide frigorigène permettant de refroidir et de liquéfier le gaz naturel par simple détente. Il est appréhendé comme l'assemblage en série de quatre sous-systèmes :

$$A_{PRICO} = A_{st} A_{cv} A_{cf} A_{liq} \quad (A1)$$

où :

$A_{st}$  disponibilité du sous-système circuit traitement gaz ;

$A_{cv}$  disponibilité du sous-système circuit vapeur ;

$A_{cf}$  disponibilité du sous-système circuit frigorifique ;

$A_{liq}$  disponibilité du sous-système circuit liquéfaction.

A.2 Disponibilité du sous-système circuit  
traitement gaz

Ce sous-système a pour objectif d'éliminer l'eau et le CO<sub>2</sub> présents dans le gaz naturel susceptibles de donner en cours de liquéfaction des hydrates et des composés solides provoquant le bouchage des équipements à basse température. Le principe est donc :

- d'éliminer le gaz carbonique par lavage avec une solution de monoéthanolamine (MEA) au niveau d'une tour de contact ;
- de déshydrater le gaz naturel par passage sur un lit de tamis moléculaires précédés d'une garde d'alumine.

Le circuit traitement gaz est lui-même décomposé en trois sous-systèmes de niveau inférieur disposés en série :

$$A_{st} = A_{ca} A_{cr} A_{cg} \quad (A2)$$

$A_{ca}$  disponibilité du circuit amine ;

$A_{cr}$  disponibilité du circuit régénération ;

$A_{cg}$  disponibilité du circuit gaz naturel.

Le modèle de disponibilité du circuit amine est élaboré sur la base de son diagramme de fiabilité (*fig. 8a*), et à partir des modèles simples de disponibilité des dispositions les plus courantes :

$$A_{ca} = \left( \frac{2\mu_p^2 + 2\mu_p\lambda_p}{\lambda_p^2 + 2\mu_p\lambda_p + 2\mu_p^2} \right)^2 \cdot \left( \frac{\mu_e}{\mu_e + \lambda_e} \right)^3 \prod_{i=1}^{n=3} \frac{\mu_{ai}}{\mu_{ai} + \lambda_{ai}} \quad (A3)$$

$\lambda_p, \mu_p$  taux de défaillance et taux de réparation de la pompe ;

$\lambda_e, \mu_e$  taux de défaillance et taux de réparation de l'échangeur ;

$\lambda_{a1}, \mu_{a1}$  taux de défaillance et taux de réparation du réservoir d'amine ;

$\lambda_{a2}, \mu_{a2}$  taux de défaillance et taux de réparation de la tour de lavage ;

$\lambda_{a3}, \mu_{a3}$  taux de défaillance et taux de réparation du régénérateur d'amine.

Le circuit de régénération est essentiellement composé, d'un compresseur de régénération, d'un réchauffeur, d'un réfrigérant et d'un ballon séparateur. Le modèle de disponibilité du circuit de régénération est élaboré comme pour le circuit précédent sur la base de son diagramme de fiabilité (*fig. 8b*) et à partir des modèles de base de la disponibilité. Cette démarche est reproduite pour l'ensemble des sous-systèmes qui suivent. De ce fait, la disponibilité du circuit de régénération s'exprime par la relation suivante :

$$A_{cr} \left( \frac{\mu_e}{\mu_e + \lambda_e} \right)^2 \left[ \left( \left( \frac{\mu_e}{\mu_e + \lambda_e} \right)^2 + \left( \frac{2\mu_c^2 + 2\mu_c\lambda_c}{\lambda_c^2 + 2\mu_c\lambda_c + 2\mu_c^2} \right) \prod_{i=1}^{n=2} \frac{\mu_{ri}}{\mu_{ri} + \lambda_{ri}} \right) - \left( \left( \frac{\mu_e}{\mu_e + \lambda_e} \right)^2 \left( \frac{2\mu_c^2 + 2\mu_c\lambda_c}{\lambda_c^2 + 2\mu_c\lambda_c + 2\mu_c^2} \right) \prod_{i=1}^{n=2} \frac{\mu_{ri}}{\mu_{ri} + \lambda_{ri}} \right) \right] \quad (A4)$$

$\lambda_c, \mu_c$  taux de défaillance et taux de réparation du compresseur ;

$\lambda_e, \mu_e$  taux de défaillance et taux de réparation de l'échangeur ;

$\lambda_{r1}, \mu_{r1}$  taux de défaillance et taux de réparation de l'échangeur ;

$\lambda_{r2}, \mu_{r2}$  taux de défaillance et taux de réparation du ballon séparateur.

Le circuit gaz naturel de l'unité de traitement est constitué de trois colonnes d'adsorption travaillant alternativement en séchage et en régénération d'échangeurs et de filtres (*fig. 8c*). La disponibilité du circuit gaz s'obtient par l'expression suivante :

$$A_{cg} \left( \sum_{k=2}^{n=3} \frac{C_n^k \mu_s^k \lambda_s^{n-k}}{(\mu_s + \lambda_s)^n} \right) \left( \frac{2\mu_f^2 + 2\mu_f\lambda_f}{\lambda_f^2 + 2\mu_f\lambda_f + 2\mu_f^2} \right) \left( \frac{\mu_e}{\mu_e + \lambda_e} \right)^2 \left( \frac{\mu_b}{\mu_b + \lambda_b} \right) \quad (A5)$$

$\lambda_s, \mu_s$  taux de défaillance et taux de réparation du sécheur ;

$\lambda_f, \mu_f$  taux de défaillance et taux de réparation du filtre ;

$\lambda_e, \mu_e$  taux de défaillance et taux de réparation de l'échangeur ;

$\lambda_b, \mu_b$  taux de défaillance et taux de réparation du ballon séparateur.

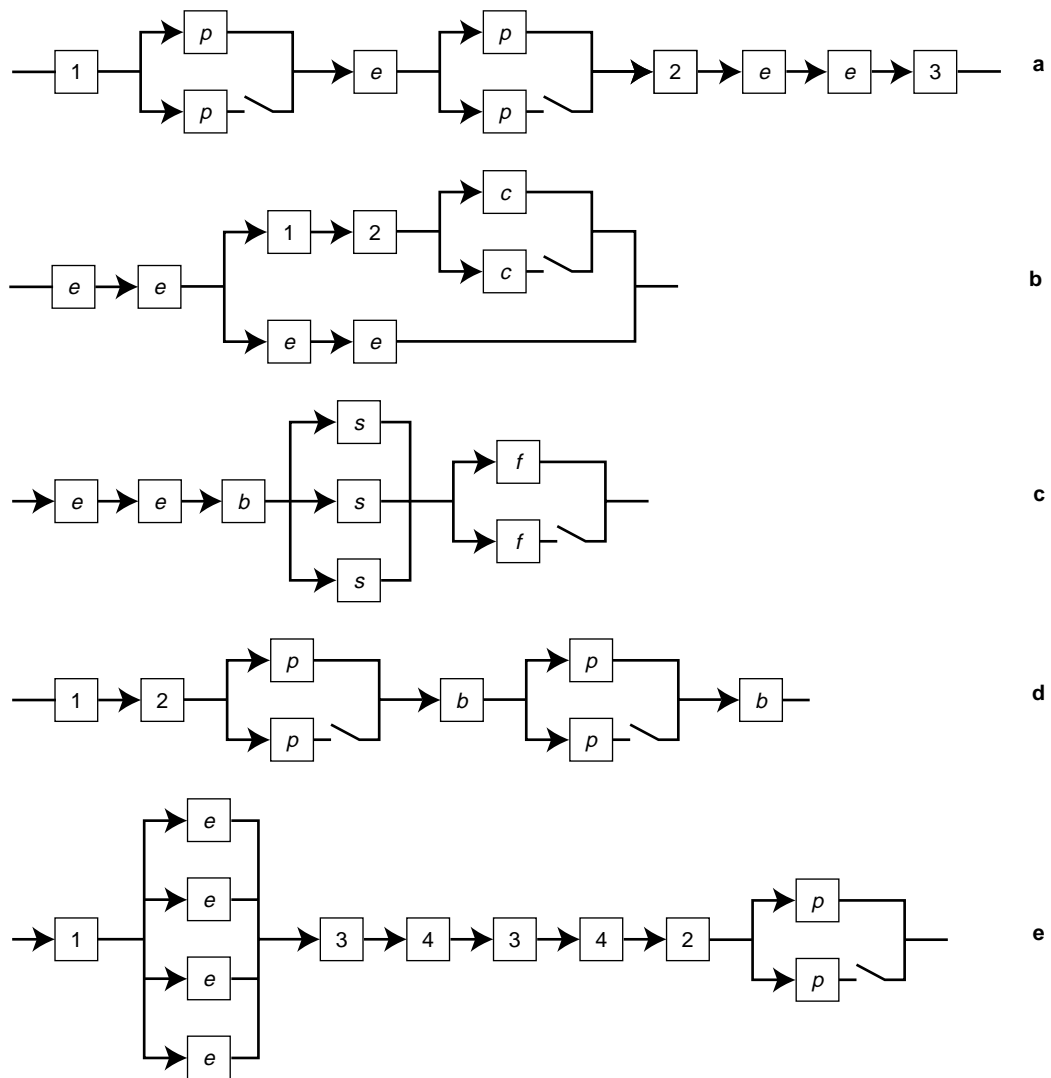


Figure 8

Diagramme de fiabilité des sous-systèmes du procédé PRICO.

(a) 1 : réservoir d'amine,  $p$  : pompe d'amine,  $e$  : échangeur, 2 : tour de lavage, 3 : régénérateur d'amine.

(b) 1 : échangeur, 2 : ballon séparateur,  $e$  : échangeur,  $c$  : compresseur de régénération.

(c)  $e$  : échangeur,  $b$  : ballon séparateur,  $s$  : sécheur,  $f$  : filtre.

(d) 1 : chaudière, 2 : turbine, 3 : pompes d'extraction,  $b$  : ballon, 3 : pompes alimentaires.

(e) 1 : déméthaniseur,  $e$  : échangeur de réfrigérant, 2 : échangeur de gaz combustible 3 : vanne Joule-Thompson, 4 : ballon de flash,  $p$  : pompes GNL.

Reliability diagrams of the PRICO process subsystems.

### A.3 Disponibilité du Sous-Système Circuit Frigorifique

Ce circuit est composé principalement d'échangeurs de réfrigérants disposés en parallèle, de pompes en redondance passive ainsi que d'un certain nombre d'éléments disposés en série (fig. 4). La disponibilité du circuit frigorifique est donnée par la relation suivante :

$$A_{cf} = \left( \sum_{k=2}^{n=3} \frac{C_n^k \mu_c^k \lambda_c^{n-k}}{(\mu_c + \lambda_c)^n} \right) \left[ 2 \left( \frac{\mu_m^2 + 2\mu_m \lambda_m}{\mu_m^2 + 2\mu_m \lambda_m + \lambda_m^2} \cdot \frac{\mu_b}{\mu_b + \lambda_b} \right) - \left( \frac{\mu_m^2 + 2\mu_m \lambda_m}{\mu_m^2 + 2\mu_m \lambda_m + \lambda_m^2} \cdot \frac{\mu_b}{\mu_b + \lambda_b} \right)^2 \right] \left( \frac{2\mu_p^2 + 2\mu_p \lambda_p}{\lambda_p^2 + 2\mu_p \lambda_p + 2\mu_p^2} \right)^{n=2} \prod_{i=1} \frac{\mu_{fi}}{\mu_{fi} + \lambda_{fi}} \quad (\text{A6})$$

où :

$\lambda_c, \mu_c$  taux de défaillance et taux de réparation du condenseur ;

$\lambda_m, \mu_m$  taux de défaillance et taux de réparation du sous-système  $m$  ;

$\lambda_b, \mu_b$  taux de défaillance et taux de réparation du ballon séparateur ;

$\lambda_p, \mu_p$  taux de défaillance et taux de réparation de la pompe ;

$\lambda_{f1}, \mu_{f1}$  taux de défaillance et taux de réparation du ballon séparateur ;

$\lambda_{f2}, \mu_{f2}$  taux de défaillance et taux de réparation du compresseur.

#### A.4 Disponibilité du sous-système circuit vapeur

Ce circuit est composé essentiellement d'une chaudière, de pompes en redondance passive et d'éléments disposés en série (fig. 8d). La disponibilité du circuit vapeur est donnée par la relation :

$$A_{cv} = \left( \frac{2\mu_p^2 + 2\mu_p\lambda_p}{\lambda_p^2 + 2\mu_p\lambda_p + 2\mu_p^2} \right)^2 \left( \frac{\mu_b}{\mu_b + \lambda_b} \right)^{2n-2} \prod_{i=1}^{n-2} \frac{\mu_{vi}}{\mu_{vi} + \lambda_{vi}} \quad (A7)$$

$\lambda_p, \mu_p$  taux de défaillance et taux de réparation de la pompe ;

$\lambda_b, \mu_b$  taux de défaillance et taux de réparation du ballon ;

$\lambda_{v1}, \mu_{v1}$  taux de défaillance et taux de réparation de la chaudière ;

$\lambda_{v2}, \mu_{v2}$  taux de défaillance et taux de réparation de la turbine.

#### A.5 Disponibilité du circuit de liquéfaction

La disponibilité du circuit de liquéfaction du procédé PRICO est déterminée sur la base du diagramme de fiabilité (fig. 8e) et elle est donnée par la relation suivante :

$$A_{liq} = \left( \sum_{k=2}^{n-4} \frac{C_n^k \mu_e^k \lambda_e^{n-k}}{(\mu_e + \lambda_e)^n} \right) \left( \frac{2\mu_p^2 + 2\mu_p\lambda_p}{\lambda_p^2 + 2\mu_p\lambda_p + 2\mu_p^2} \right) \left( \prod_{i=3}^{n-4} \left( \frac{\mu_{li}}{\mu_{li} + \lambda_{li}} \right)^2 \right) \left( \prod_{i=1}^{n-2} \frac{\mu_{li}}{\mu_{li} + \lambda_{li}} \right) \quad (A8)$$

$\lambda_e, \mu_e$  taux de défaillance et taux de réparation de l'échangeur de réfrigérant ;

$\lambda_p, \mu_p$  taux de défaillance et taux de réparation de la pompe ;

$\lambda_{f1}, \mu_{f1}$  taux de défaillance et taux de réparation du déméthaniseur ;

$\lambda_{f2}, \mu_{f2}$  taux de défaillance et taux de réparation de l'échangeur de gaz combustible ;

$\lambda_{f3}, \mu_{f3}$  taux de défaillance et taux de réparation de la vanne de Joule-Thompson ;

$\lambda_{f4}, \mu_{f4}$  taux de défaillance et taux de réparation du ballon de flash.