



SOLUTION MBSA POUR DÉTERMINER ET ANALYSER LA DISPONIBILITÉ DE PRODUCTION DE FERMES ÉOLIENNES OFFSHORE

MBSA MODEL TO EVALUATE AND ANALYZE THE PRODUCTION AVAILABILITY OF OFFSHORE WIND FARMS

BOUGOÛIN Baptiste
TotalEnergies
Paris

baptiste.bougouin@totalenergies.com

ESTÉCAHANDY Maïder
TotalEnergies
Pau

maider.estecahandy@totalenergies.com

CLÉMENT Guillaume
TotalEnergies
Pau

guillaume.clement@totalenergies.com

CLAVÉ Nicolas
TotalEnergies
Pau

nicolas.clave@totalenergies.com

Résumé — La complexité de la modélisation d'un parc éolien offshore repose sur la précision de la simulation, notamment sur la manière dont l'impact météorologique est pris en compte. En effet, tous les effets induits sur les temps de mobilisation des navires d'intervention, la puissance des turbines et la stratégie de maintenance doivent être pris en compte correctement car ils peuvent avoir un impact significatif sur les résultats. Face à de telles contraintes et suite à une étude comparative de logiciels et méthodes existants, il est apparu qu'une technique de modélisation type MBSA (Model-Based Safety Assessment) développée en interne était la meilleure solution. Dans le cadre de l'analyse de sûreté de fonctionnement des systèmes, le MBSA est une approche qui consiste à construire des modèles de haut niveau, donc plus proches des descriptions d'architectures fonctionnelles et physiques des systèmes, tout en permettant d'évaluer des indicateurs RAM (Reliability, Availability, Maintainability) par des moteurs de calcul (Batteux, 2022). Chez TotalEnergies, ce type de travaux a déjà été mené pour l'industrie pétrolière et gazière à travers le module Petro de la suite logicielle GRIF (GRaphiques Interactifs pour la Fiabilité), technologie de TotalEnergies (GRIF, 2023a), qui supporte l'approche MBSA (Batteux, 2016). Cependant, ce module n'étant pas en mesure de répondre pleinement aux nouveaux défis et contraintes O&M (Opérations et Maintenance) apportés par le marché de l'éolien *offshore*, il a été décidé de proposer une alternative avec le module Flex.

Mots-clefs — *Éolien offshore, réseaux de Petri, GRIF, MBSA, Opérations et Maintenance, Disponibilité de production*

Abstract — The complexity of modeling an offshore wind farm depends on the accuracy of the simulation, particularly on the way in which the meteorological impact is considered. Indeed, all the effects induced on the mobilization times of intervention vessels, the power of the turbines and the maintenance strategy must be considered correctly because they can have a significant impact on the results. Faced with such constraints and following a comparative study of existing software and methods, it appeared that an MBSA (Model-Based Safety Assessment) type modeling technique developed internally was the best solution. In the context of the operational safety analysis of systems, MBSA is an approach which consists of constructing high-level models, therefore closer to the descriptions of functional and physical architectures of systems, while making it possible to evaluate RAM indicators (Reliability, Availability, Maintainability) by calculation engines (Batteux, 2022). At TotalEnergies, this type of work has already been carried out for the oil and gas industry through the Petro module of the GRIF (Interactive Graphics for Reliability) software suite, TotalEnergies technology (GRIF, 2023a), which supports the MBSA approach (Batteux, 2016). However, as this module is not able to fully respond to the new O&M (Operations & Maintenance) challenges and constraints brought by the offshore wind market, it was decided to offer an alternative with the Flex module.

Keywords — *Offshore Wind, Petri nets, GRIF, MBSA, Operations & Maintenance, Production availability*

INTRODUCTION

TotalEnergies est un des acteurs majeurs de la transition énergétique. Tous les collaborateurs sont conscients des enjeux que soulèvent nos activités et notre propre transformation aux côtés de la société avec une ambition « émissions net zéro » d'ici 2050. Pour y parvenir, le groupe s'est fixé les objectifs suivants :

- Réduire au maximum les émissions de gaz à effet de serre, en priorité sur les sites en Europe et dans le monde dont il est directement responsable.
- Compenser toutes les émissions restantes, par exemple grâce à des projets de capture de CO₂.
- En parallèle, proposer un mix énergétique de moins en moins carboné avec le développement des énergies renouvelables (solaire, hydrogène, éolien...).

Pour enrichir le mix énergétique, dès 2022, de nouveaux projets de parcs éoliens *offshore* verront le jour à proximité des réseaux de consommation. Ces projets soulèveront de nouvelles questions auxquelles l'industrie s'apprête à répondre. A cette fin, les études de Fiabilité, Maintenabilité Disponibilité, Sécurité (FMDS ou RAM = *Reliability, Availability, Maintainability*) peuvent aider à définir la meilleure stratégie d'exploitation et de maintenance (O&M = Opérations & Maintenance) à appliquer, c'est-à-dire celle permettant d'atteindre l'optimum entre les dépenses d'exploitation (OPEX = *OPERating EXPenditures*) et la disponibilité de production (ISO20815, 2018) pour une ferme éolienne donnée.

L'objectif du travail réalisé est de construire une solution permettant d'évaluer et d'analyser la disponibilité de production pour tout parc éolien *offshore*. La méthodologie et les fonctionnalités seront démontrées à travers l'exemple du futur projet de parc éolien Attentive Energy One (AE1) de TotalEnergies. Toutes les données et chiffres mentionnés dans cet article sont uniquement à des fins de représentation.

L'étude de disponibilité de production (= PAS pour *Production Availability Study*), ce qu'on appelle « étude RAM » en général dans l'industrie, est un savoir-faire historique chez TotalEnergies. À partir des années 1980, les experts RAM ont créé des moteurs de calcul et une interface graphique dédiée dans une suite logicielle appelée GRIF (GRIF, 2023a). Depuis, parmi les possibilités offertes par le logiciel, de nombreuses PAS ont été réalisées au fil des années. Pour l'industrie pétrolière et gazière (O&G = *Oil and Gas*), un module dédié nommé Petro (GRIF, 2023e) a été créé en 2013 et permet d'obtenir des résultats d'études PAS détaillés, explicables et fiables. Reconnu dans le domaine de la Sûreté de Fonctionnement (SdF), cet outil est présenté comme une solution MBSA (*Model Based Safety Assessment*) (Batteux, 2016). Dans le cadre de l'analyse de la sécurité des systèmes, l'approche MBSA est une approche qui consiste à construire des modèles de haut niveau très proches des descriptions des architectures fonctionnelles et physiques des systèmes, tout en restant évaluables par les outils de calcul d'indicateurs de sécurité (Batteux, 2022).

Aujourd'hui, face à la nécessité de réaliser des études PAS pour l'éolien *offshore*, TotalEnergies peut compter sur ses acquis pour créer un nouveau module dédié. La méthodologie globale reste la même :

- Collecte des données d'entrée : rassembler toutes les informations nécessaires à la construction d'un modèle de simulation détaillé/exhaustif à savoir la localisation des unités, l'impact des défaillances d'équipement et des interventions planifiées, la stratégie O&M, la logistique maritime, les ressources humaines, etc. (aucun sujet pouvant impacter directement ou indirectement la performance des installations n'est à oublier) ;
- Modélisation : construire un modèle dans GRIF et implémenter à la fois l'architecture du système étudié (logique fonctionnelle et dysfonctionnelle, redondances, etc.) et chacune des données opérationnelles collectées à l'étape précédente ;
- Simulation : exécuter des simulations du modèle afin d'obtenir et analyser la disponibilité de production et ses indicateurs clés de performance (KPI = *Key Performance Indicator*) associés.

Cependant, le secteur éolien *offshore* apporte de nouveaux défis, et le module GRIF Petro n'était pas encore au niveau des standards de l'industrie sur certains aspects. Une illustration rapide de cela est la complexité de prise en compte de la disponibilité logistique, l'accessibilité et les déplacements géographiques. Par exemple, si l'on considère quinze minutes pour déployer une passerelle à chaque fois qu'un *Service Operating Vessel* (SOV) se connecte à une éolienne, la durée cumulée de ce déploiement est d'environ un an pour un projet opérationnel de trente ans. Suite à un *benchmark* des logiciels et méthodes existants sur le marché, il est apparu qu'un modèle MBSA dédié était la meilleure option à mettre en œuvre. Pour cet exercice, le module Flex (GRIF, 2023b) de GRIF associé au module Petri (GRIF, 2023d) est une solution puissante car le premier permet d'approfondir la modélisation des équipements, des ressources, des séries temporelles et des options de calcul sans être rattaché à un domaine industriel spécifique. Ainsi, malgré la quantité de données d'entrée et autres complexités, la solution développée avec Flex peut gérer (entre autres) :

- Des séries temporelles :
 - Conditions météorologiques (vitesse et orientation du vent, hauteur et orientation des vagues) ;
 - Production instantanées générées en fonction des vitesses de vent et des courbes de puissance ;
- Configurations (emplacement des équipements, dépendances des sous-structures et des câbles, etc.) ;
- Tâches O&M pour chaque équipement :
 - Pannes critiques (avec loi et données de fiabilité dédiées, ressources nécessaires, etc.) ;

- Maintenance préventive (avec planification dédiée, ressources nécessaires, etc.) ;
- Logistique maritime :
 - Types de navires (SOV, navire de transfert d'équipage (CTV = *Crew Transfer Vessel*), navire sous-marin télécommandé (ROV = *Remotely Operated Vessel*, etc.) ;
 - Critères météorologiques (accessibilité aux équipements, vitesse de croisière selon les conditions météorologiques, etc.) ;
 - Localisation géographique et vitesse (en ferme, hors ferme, zone à contraintes environnementales, positionnement dynamique par pilotage automatique, etc.) ;
 - Durées des activités (connexion/déconnexion aux équipements, transfert des personnels et des pièces de rechanges, rotations, etc.).
- Équipes de maintenance :
 - Compétences ;
 - Conditions de travail (jours, horaires, etc.) ;
 - Dimensionnement des équipes permanentes et lors des campagnes saisonnières ;
- Gestion des pièces détachées :
 - Etat du stock (initial, minimal, maximal, permanent et lors des campagnes saisonnières, etc.) ;
 - Fonctionnalités de réapprovisionnement (à la demande ou périodique, durée unitaire, quantité, etc.).

METHODOLOGIE

L'outil sélectionné pour modéliser rigoureusement l'ensemble des paramètres requis et contraintes critiques pour ce type de projet est la technique des réseaux de Petri stochastiques à prédicats et assertions implémentée dans le module GRIF Petri. Pour en savoir plus sur cette approche de modélisation, de nombreux articles et documents sont disponibles dans la littérature (Signoret, 2013 & IEC 62551, 2012). L'exemple présenté en « Fig. 1 » est un cas avec un équipement et deux équipes de réparation. Les fonctionnalités des réseaux de Petri à prédicats et assertions permettent de modéliser, dans cet exemple, la gestion des dépendances entre la disponibilité d'une équipe de réparation et le début de la panne.

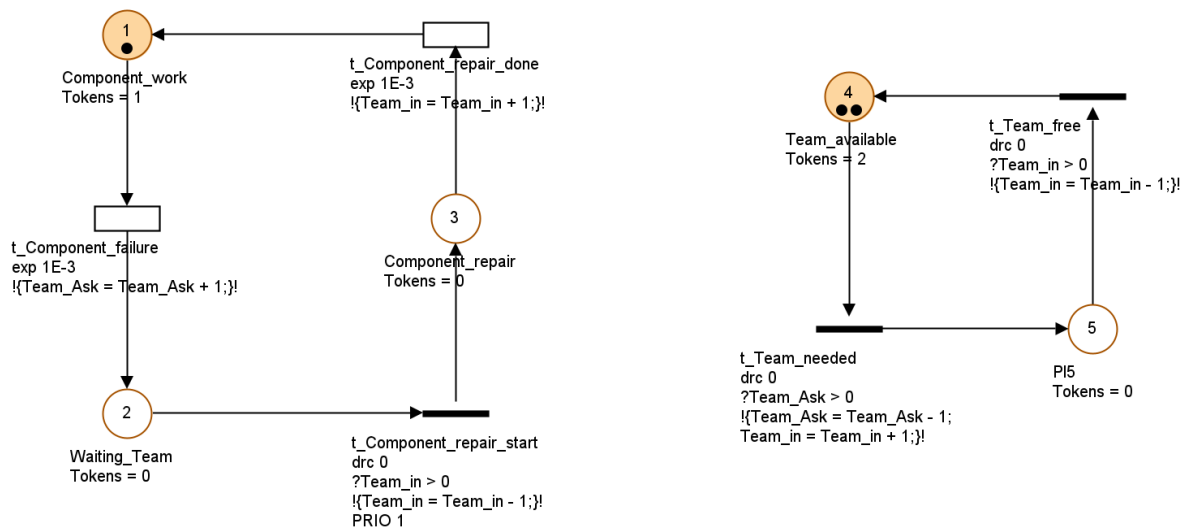


Fig. 1. Exemple de réseau de Petri d'un équipement et deux équipes de réparations (source : GRIF Petri).

La complexité supplémentaire de la modélisation d'un équipement pour un parc éolien *offshore* repose (entre autres) sur :

- La capacité de production selon les états, les tâches, l'accessibilité pour les moyens logistique, etc. ;
- La priorité des tâches ;
- La quantité de types de pannes ;
- La quantité de maintenance préventive ;
- Les possibilités ou ressources nécessaires à une tâche :
 - Divers types de compétences de la part de l'équipe de réparation interne ou des fournisseurs ;

- Divers types de pièces de rechange ;
- Divers types de moyens logistiques pour fournir les ressources ;
- Les allers-retours dus aux heures nocturnes sans travail.

Dans la figure suivante « Fig. 2 », il est possible de visualiser en réseau de Petri :

- (a) La place de l'état de réparation ;
- (b) La transition de fin de réparation ;
- (c) La transition d'initialisation du départ avant la fin de réparation ;
- (d) La transition de fin de connexion du bateau réservé ;
- (e) La transition de départ du bateau réservé.

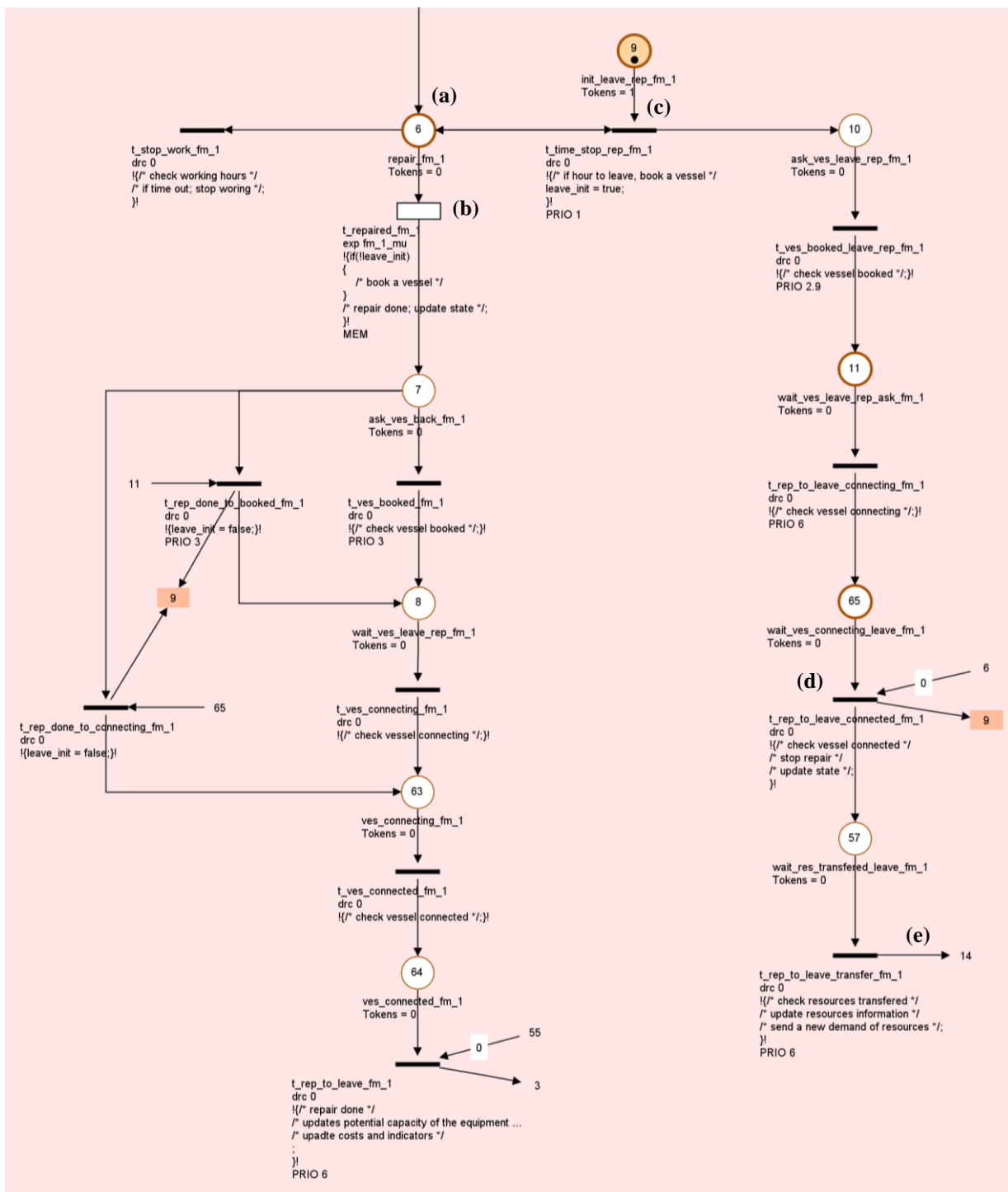


Fig. 2. Réseau de Petri anonymisé des actions précédent et suivant la réparation d'un type de panne d'un équipement éolien offshore (source : GRIF Petri).

Ce réseau de Petri est une sous-partie d'un ensemble qui décrit un seul type de panne. La complexité dans cette partie du processus de réparation réside dans le nombre de séquences possibles. Si le jeton est dans la place < *repair_fm_1* », cela signifie que l'équipement est en état de réparation et le diagramme de décision associé est visible dans la figure suivante « Fig. 3 ».

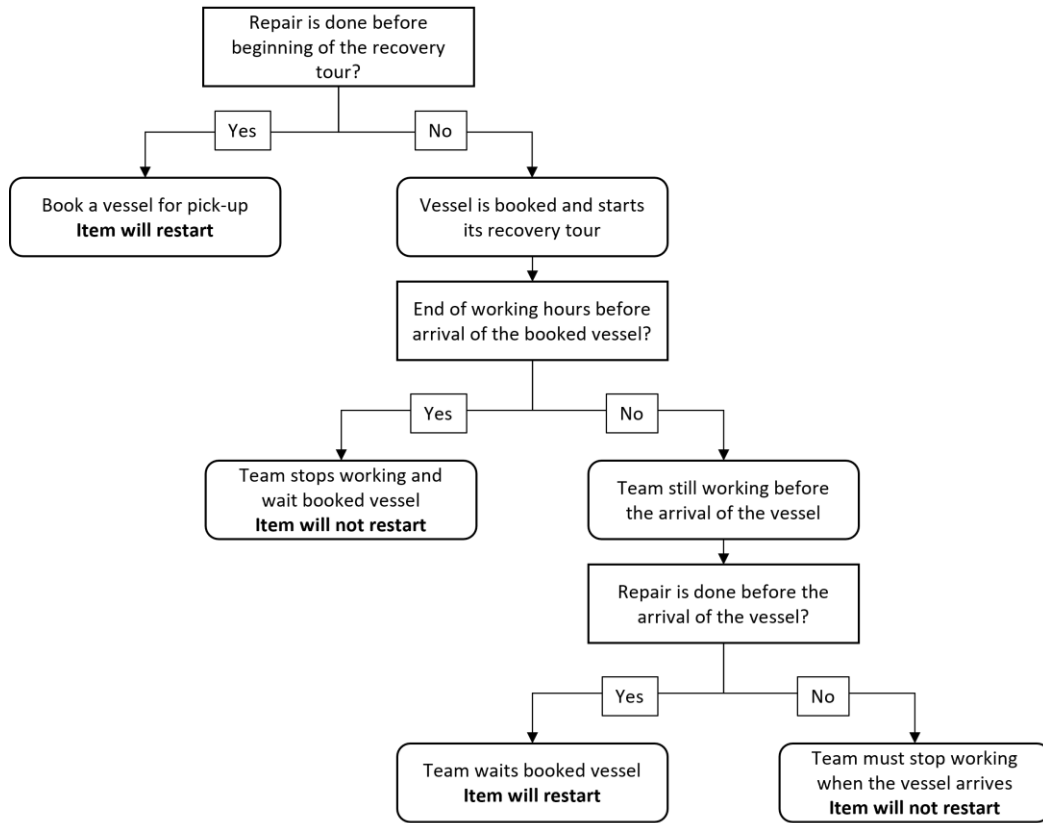


Fig. 3. Diagramme de décision à modéliser lorsque qu'un équipement est en cours de réparation (source : interne).

Le modèle complet d'un équipement doit contenir tous les éléments et fonctionnalités répertoriés précédemment (événements planifiés et non planifiés, interactions avec les ressources, gestion des effets météo, etc.). In fine, une bibliothèque de modèles génériques a été élaborée : un réseau de Petri a été construit/optimisé/validé pour chaque type d'équipement et/ou de contrainte à modéliser. Cependant, il faudrait beaucoup de temps pour dupliquer ces modèles au périmètre d'un parc éolien offshore fait de plusieurs dizaines d'éoliennes, de câbles, de sous-stations, etc.

La solution à cette problématique est l'utilisation du module Flex de GRIF. Ce module s'appuie sur le principe des blocs diagramme de fiabilité. Il est possible de masquer n'importe quel réseau de Petri élaboré par l'utilisateur derrière des blocs stochastiques et de les relier comme le montre la figure ci-dessous « Fig. 4 » :

- (a) Un bloc diagramme de fiabilité ;
- (b) Un lien process entre deux blocs ;
- (c) Une illustration d'un réseau de Petri imbriqué dans un bloc.

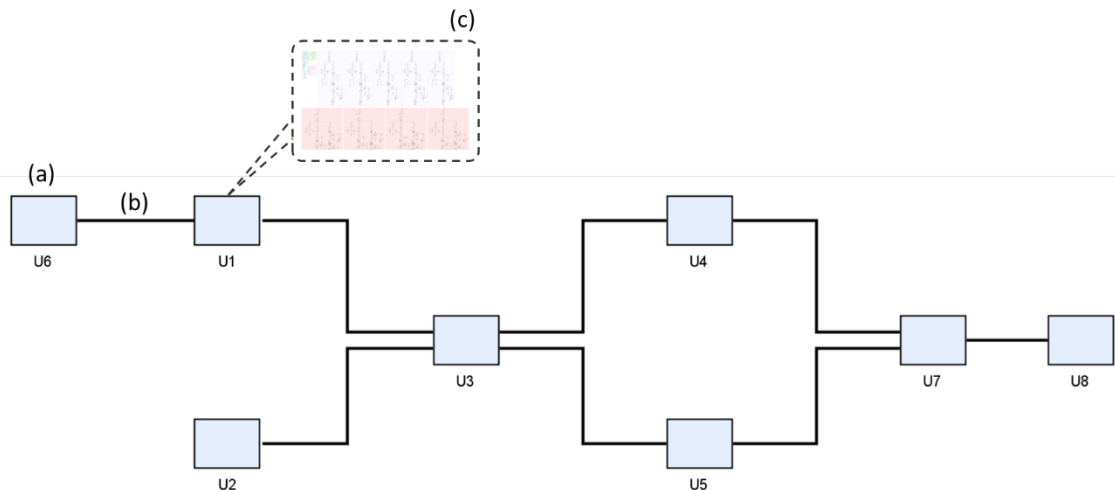


Fig. 4. Schéma de blocs diagramme fiabilité dans Flex (source : GRIF Flex).

Les caractéristiques du module Flex ne seront pas détaillées dans cet article, ainsi un exemple de modèle test complet avec neuf éoliennes est présenté dans la figure suivante « Fig. 5 ».

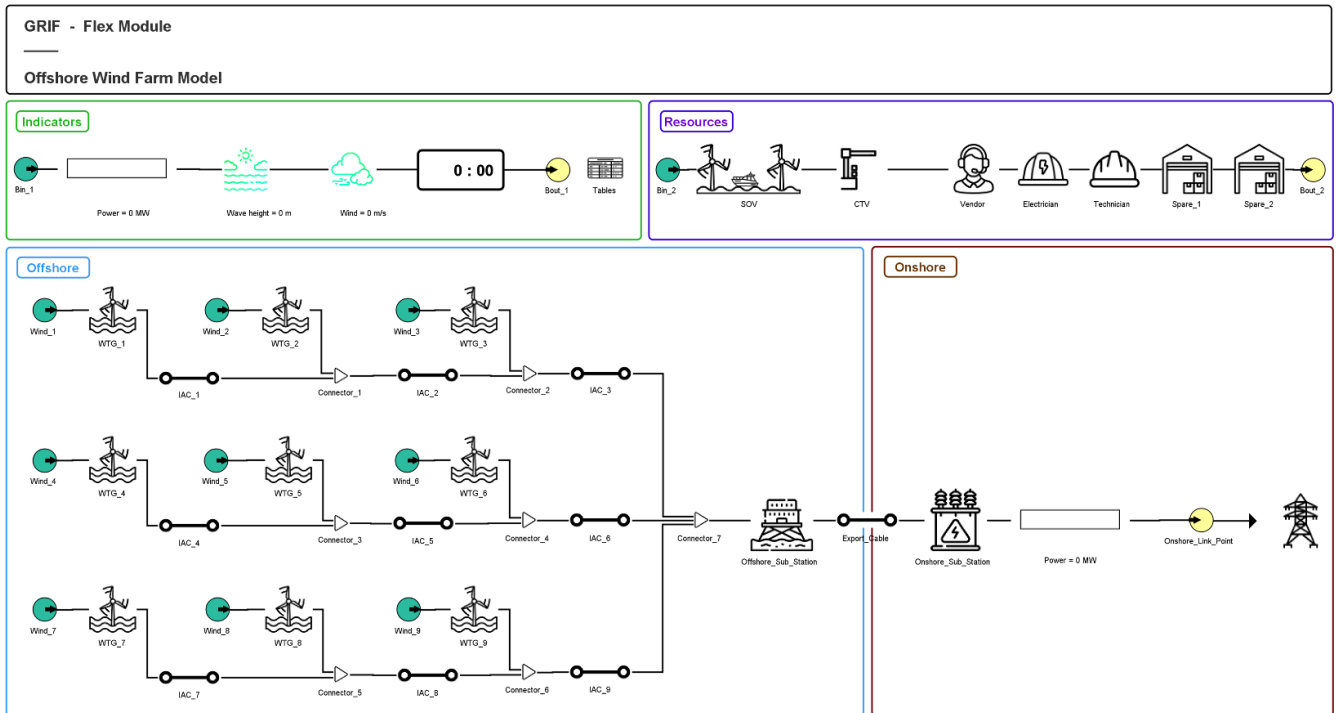


Fig. 5. Exemple d'un cas test de ferme éolienne offshore avec Flex (source : GRIF Flex).

Les réseaux de Petri générés par le cas test ci-dessus ont les statistiques suivantes :

- 6 308 places ;
- 2 795 variables ;
- 8 982 transitions ;
- 5 645 paramètres ;
- 21 048 arcs.

Le cas d'application de cette méthodologie est le projet AE1 avec des dizaines d'éoliennes installées à des centaines de kilomètres du rivage avec une durée de vie opérationnelle de plusieurs dizaines d'années. Les éléments des réseaux de Petri atteignent des dizaines de milliers d'objets pour un tel modèle. La simulation est basée sur le principe de Monte-Carlo. Cette solution mathématique a été implémentée sous la forme d'un moteur de calcul nommé MOCA-RP (MONte-CARlo - Réseaux de Petri) au sein de GRIF dans les années 1980 (GRIF, 2023f & Estécahandy, 2016). Malgré la robustesse de ce moteur de calcul, le temps de calcul peut être très long lorsque 10 000 histoires sont simulées. Pour le modèle AE1, les calculs pourraient durer un mois complet sur un ordinateur classique à 8 cœurs. Des calculs rapides sont rendus possibles par la mise à disposition du plugin HPC (*High Performance Computing*) (GRIF, 2023c) au sein de la suite logicielle GRIF qui permet d'utiliser un cluster dédié de processeurs installés en parallèle et de minimiser les temps de calcul (d'un mois à une heure pour le modèle AE1).

DISCUSSIONS

Tous les résultats donnés dans cette section sont entièrement anonymisés et à des fins d'illustration uniquement.

La PAS sur le projet AE1 permet de récupérer les principaux KPIs. Pour commencer et comme c'est la plus pertinente, la disponibilité de production est obtenue avec la formule suivante selon la norme ISO correspondante (ISO 20815, 2018) :

$$Production\ availability\ (\%) = \frac{Effective\ production}{Expected\ production}$$

Cet indicateur mesure le taux de production estimé par rapport à la production attendue. Dans GRIF, cette valeur est obtenue en moyennant les disponibilités annuelles tel que défini par l'approche A de la norme correspondante (ISO 20815, 2018). La figure suivante « Fig. 6 » permet d'observer l'évolution de la production estimée (en bleu) face à la production attendue (en violet) année après année au cours de la durée d'exploitation.

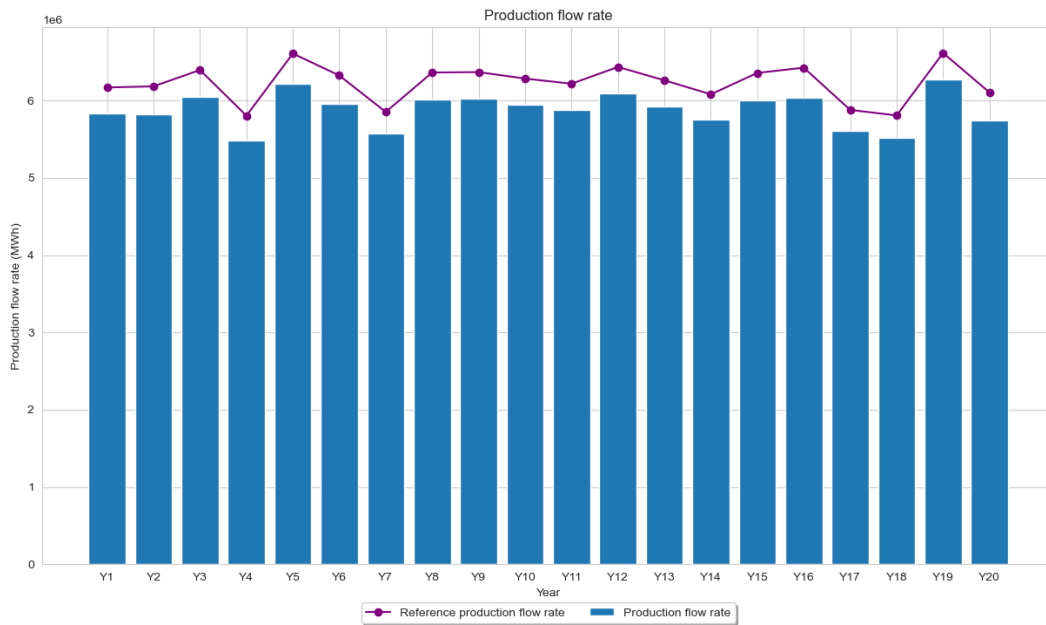


Fig. 6. Graphique anonymisé du débit de production annuel (source : GRIF Flex).

Les fluctuations observées sur le débit de production de référence d'une année à l'autre sont dues aux variations de la vitesse du vent. Les barres capturent le même phénomène et incluent également l'impact des tâches de maintenance (planifiées et non planifiées). L'évaluation de ces données permet d'apprécier le niveau de performance du projet en analysant sa capacité à délivrer le profil de production attendu, mais également d'identifier les points faibles de la conception et les principaux contributeurs de pertes pour optimiser la conception et la stratégie O&M.

La figure suivante « Fig. 7 » représente la disponibilité de production année par année sur la durée d'exploitation. Il permet de se concentrer sur l'impact des tâches de maintenance. En effet, même si les variations de vitesse du vent impactent la stratégie O&M avec des tâches opportunistes, elles n'impactent pas la valeur de la disponibilité de production pour ce parc. La barre horizontale violette représente la disponibilité de production globale obtenue précédemment et permet de voir l'impact de certaines tâches saisonnières majeures sur la durée de vie opérationnelle.

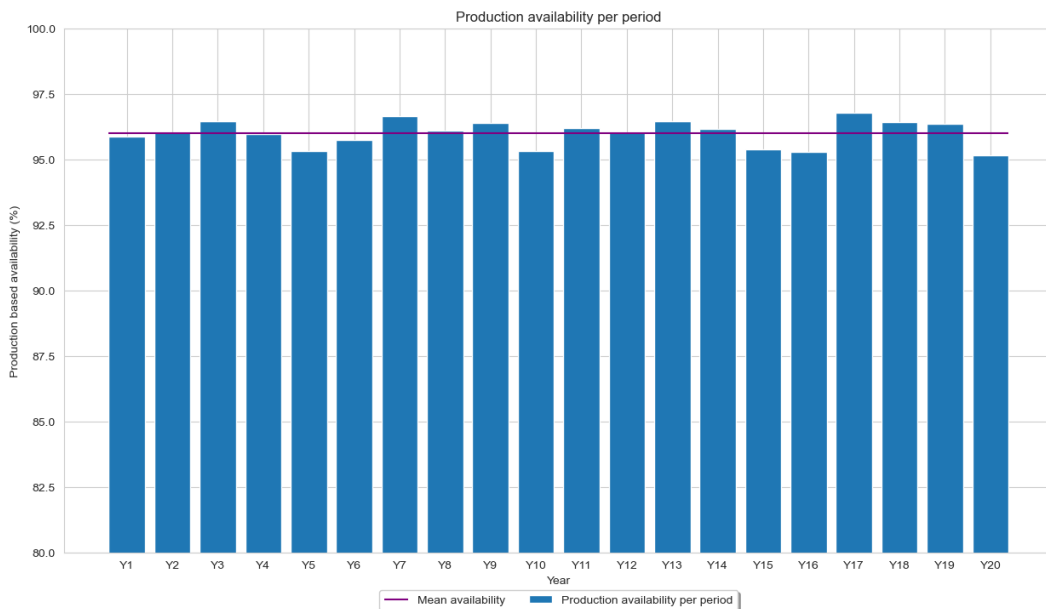


Fig. 7. Graphique anonymisé de la disponibilité de production annuelle (source : GRIF Flex).

Pour assurer et approfondir l'analyse de la perte de production, le modèle permet de capturer de nombreuses données de sortie. Un choix important pour expliquer les pertes est la répartition des pertes de cotisations sur chaque famille d'équipements comme indiqué dans le tableau ci-dessous « TABLE I. ».

TABLE I. TABLE ANONYMISEE DE LA REPARTITION DES CONTRIBUTEURS AUX PERTES

		Contributions relatives (%) aux pertes	Contributions absolues (%) aux pertes
Éoliennes		60%	2.4%
	Non planifié	50%	2%
	Planifié	2%	0.08%
	Conditions météo	8%	0.32%
Câbles inter-éoliennes		2%	0.08%
	Non planifié	1.5%	0.06%
	Conditions météo	0.5%	0.02%
Sous-station offshore		35%	1.4%
	Non planifié	4%	0.16%
	Planifié	30%	1.2%
	Conditions météo	1%	0.04%
Câble d'export		3%	0.12%
	Non planifié	2%	0.08%
	Conditions météo	1%	0.04%
TOTAL		100%	4%

Les valeurs du tableau précédent permettent de comprendre que :

- Les pannes des éoliennes ont le plus grand impact sur les pertes de production ;
- Les tâches préventives sur la sous-station *offshore* sont à l'origine d'un tiers des pertes ;
- Les pertes dues aux contraintes météorologiques (inaccessibilité des navires en raison des conditions météorologiques) représentent dix pour cent des pertes globales.

Ces analyses permettent d'évaluer la performance de la stratégie O&M mise en place. Un autre KPI pertinent est l'évolution du *backlog* planifié. Dans cette étude, le *backlog* est la quantité de tâches qui doit être réalisée avant la fin de l'année à chaque instant. La figure suivante « Fig. 8 » montre le résultat de ce calcul.

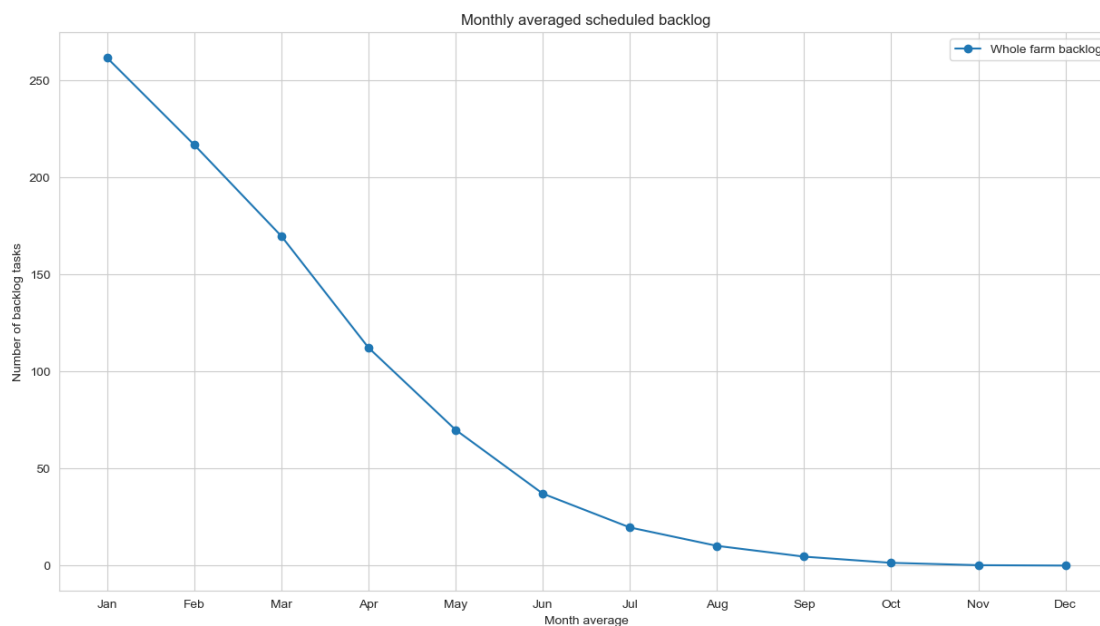


Fig. 8. Graphique anonymisé du *backlog* mensuel moyenné sur une année (source : données de sortie GRIF Flex post-traitées).

Ce graphique permet de conclure que même s'il y a des centaines de tâches préventives à programmer, en moyenne sur plusieurs années, tout est réalisé avant la fin de l'année. De nombreux autres KPIs sont obtenus mais n'apparaissent pas dans cet article.

CONCLUSION

Malgré la complexité des conditions O&M des parcs éoliens *offshore*, les réseaux de Petri mis en place combinés au module GRIF Flex permettent de réaliser des études robustes. Cette combinaison permet une validation rapide grâce à des simulations pas à pas et le modèle final est de haut niveau et très proche des descriptions des architectures fonctionnelles et physiques d'un parc éolien ; qui soutient l'aspect MBSA de la solution.

L'évolution constante de ce domaine est un défi que cette technologie peut relever grâce à la flexibilité des réseaux de Petri à prédicats et assertions associées à la robustesse de MOCA-RP et à l'efficacité du plugin HPC. Une contrainte majeure est la spécification claire et couvrante des besoins pour chaque fonctionnalité pour tout type de logistique. Des itérations régulières avec les équipes terrain et une veille technologique constante sont nécessaires pour maintenir la viabilité des modèles. Les retours d'expérience des grands projets éoliens *offshore* contribueront également à consolider la précision des données de fiabilité implémentées.

REFERENCES

- [1] ISO 20815:2018(fr), Industries du pétrole, de la pétrochimie et du gaz naturel — Assurance production et gestion de la fiabilité (2018)
- [2] Batteux, M., Prosvirnova, T., Batteux, M. Analyses de Sûreté de Fonctionnement basées modèles - Model-Based Safety Assessment (MBSA), IMdR Info n°47 (2022)
- [3] GRIF is registered trademark owned by the TotalEnergies Company and used under license, <https://grif.totalenergies.com/en> (2023)
- [4] GRIF Flex - Evaluating the performances of dynamic systems using MBSA based on Petri Nets. (2023). <https://grif.totalenergies.com/en/products/simulation-package/flex-module>
- [5] GRIF HPC plug-in -A high-performance computing extension for the MOCA-RP simulation engine. (2023). <https://grif.totalenergies.com/en/products/hpc-plugin>
- [6] GRIF Petri - Petri Net software. (2023). <https://grif.totalenergies.com/en/products/simulation-package/module-petri>
- [7] GRIF Petro - Evaluating the performance of dynamic multi-flow systems using stochastic block diagrams. (2023). <https://grif.totalenergies.com/en/products/simulation-package/petro-module>
- [8] GRIF Simulation Package - Using Monte Carlo Simulation to model and combine all types of stochastic and deterministic events. (2023). <https://grif.totalenergies.com/en/products/simulation-package>
- [9] Batteux, M., Prosvirnova, T., Rauzy, A., A Reasoned Introduction to Model-Based Risk and Safety Assessments, IMdR Lambda-Mu 16 (2016)
- [10] Signoret J.-P., Dutuit Y., Cacheux P.-J., Folleau C., Collas S. and Thomas P. Make your Petri nets understandable: Reliability block diagrams driven Petri nets. Reliability Engineering & System Safety, 113:61–75. (2013)
- [11] IEC 62551 ed1.0. (2012). Analysis techniques for dependability - Petri net techniques. International Electrotechnical Commission, Geneva.
- [12] Estécachandy, M. (2016). Méthodes accélérées de Monte-Carlo pour la simulation d'événements rares - Applications aux Réseaux de Petri. I.5:33-35
- [13] [ecologie.gouv.fr](https://www.ecologie.gouv.fr), Loi de transition énergétique pour la croissance verte, <https://www.ecologie.gouv.fr/loi-transition-energetique-croissance-verte> (2017)
- [14] DOI:10.3390/jmse10071000 - "Availability Analysis of an Offshore Wind Turbine Subjected to Age-Based Preventive Maintenance by Petri Nets" (2022)
- [15] A Better World of Energy, SSE Renewables, <https://www.sserenewables.com>