



Méthodologie pour la planification des besoins en investissements pour le renouvellement d'un parc d'actifs – Cas d'application à un groupe d'alternateurs de centrales hydroélectriques

Julien Romezin

► To cite this version:

Julien Romezin. Méthodologie pour la planification des besoins en investissements pour le renouvellement d'un parc d'actifs – Cas d'application à un groupe d'alternateurs de centrales hydroélectriques. Congrès Lambda Mu 23 “ Innovations et maîtrise des risques pour un avenir durable ” - 23e Congrès de Maîtrise des Risques et de Sécurité de Fonctionnement, Institut pour la Maîtrise des Risques, Oct 2022, Paris Saclay, France. <hal-03878155>

HAL Id: hal-03878155

<https://hal.science/hal-03878155v1>

Submitted on 29 Nov 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

Méthodologie pour la planification des besoins en investissements pour le renouvellement d'un parc d'actifs – Cas d'application à un groupe d'alternateurs de centrales hydroélectriques

*Note: Sub-titles are not captured in Xplore and should not be used

ROMEZIN Julien
CNR

2 rue André Bonin, 69004 LYON
j.romezin@cnr.tm.fr

Résumé — La priorisation des grands projets pour un gestionnaire d'infrastructures de production hydroélectriques comme CNR est un exercice complexe lié à la diversité des 3 missions historiques de l'entreprise qui sont de produire de l'électricité, de développer la navigation et de favoriser l'irrigation et les autres usages agricoles. Afin de garantir la pérennité de ce modèle, les décisions doivent être prises de manière à minimiser le risque global de l'entreprise et en tenant compte des ressources techniques, humaines et financières. Cet article décrit la méthode et les technologies utilisées pour relever chacun de ces défis au travers d'une étude de cas sur une famille d'équipements et l'influence de ces nouvelles approches sur un processus interne d'arbitrage de projets dans le cadre de la budgétisation et de la planification des investissements.

Mots-clés — *Gestion des actifs, Aide à la décision, Risque, Simulation prospective*

I. INTRODUCTION

Pour les gestionnaires d'infrastructures de production hydroélectriques, les alternateurs sont des actifs stratégiques qui sont dimensionnés pour des durées de vie importantes (de 30 à 70 ans selon la puissance installée et le type de technologie) et dont l'investissement initial est conséquent.

Le coût de construction de ce type d'actifs s'élève à plusieurs millions d'euros pour les installations de CNR. Un projet de construction d'alternateur est conditionné par la rareté des compétences techniques dans ce domaine qui fait appel à un savoir-faire particulier et dont le temps de réalisation et de mise en œuvre est considérable. Un projet de reconstruction complète représente plusieurs mois d'études préalables, plus d'un an de délai d'approvisionnement et plus d'un an de travaux.

Ainsi, une avarie nécessitant le renouvellement d'un alternateur peut entraîner une immobilisation d'un groupe de production sur des durées importantes, parfois plusieurs années en fonction de la disponibilité des fournisseurs et de la capacité des équipes d'interventions de l'organisation, ce qui peut engendrer des pertes colossales.

C'est sur ce premier cas pratique que CNR a expérimenté la mise en place d'un système de Gestion d'Actifs et notamment le déploiement d'une stratégie adaptée pour la priorisation et la planification des besoins en renouvellement, essentielle afin de garantir la pérennité de son modèle économique, et de s'assurer de disposer de la capacité et des ressources humaines, techniques et financières nécessaires.

Dans un premier temps, une présentation du contexte amenant CNR à se doter d'un système de management tel que la Gestion d'Actifs industriels, pour répondre aux enjeux structurels auquel l'entreprise doit faire face sera réalisée.

Ensuite, la méthodologie mise en œuvre pour la planification d'investissements et son application sur la problématique rencontrée pour une série d'alternateurs qui composent le parc d'équipement CNR, sera présentée.

Pour conclure par un bilan sur les changements de pratiques et des bénéfices qu'apportent le déploiement de la Gestion d'Actifs à CNR ainsi que les perspectives envisagées.

II. CONTEXTE

A. Hyper volatilité du Chiffre d'affaires

CNR vend l'essentiel de la production hydroélectrique de la concession du Rhône sur le marché de l'électricité français dont elle est un des acteurs majeur. Ainsi, elle est constamment exposée à la volatilité des prix d'une année à l'autre. Mais le caractère « fatal » d'une source d'énergie renouvelable comme l'hydroélectrique de type « fil de l'eau » du fait d'une forte dépendance aux apports d'eaux naturels sur le bassin versant du Rhône expose également l'entreprise à une forte variabilité de ces volumes de production.

Cette variabilité sur les prix et les volumes constituent une « hyper volatilité » du Chiffre d'affaires de l'entreprise évaluée à environ 30% entre 2003 (début de CNR sur le marché de l'énergie) et 2019 dont la figure 1 permet d'apprécier le phénomène.

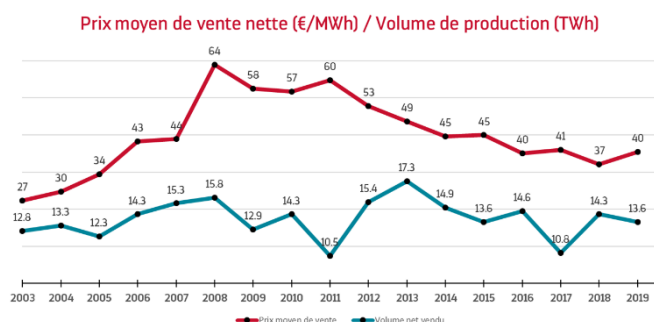


Fig. 1. Variation du prix moyen de vente et du volume de production

B. L'exploitation du Rhône, un système complexe

Un aménagement hydroélectrique, tel que ceux de la concession du Rhône, regroupe localement plusieurs activités d'exploitation assurées par différents types d'ouvrages représentés sur la figure 2 :

- Les centrales hydroélectriques assurent la production d'électricité
- Des ouvrages dédiés à la navigation (écluse petit et grand gabarit, site portuaires, etc.)
- Des ouvrages dédiés à la sûreté (digues, vannes d'évacuation de crue, etc.)

L'exploitation de ces ouvrages est une combinaison de contraintes spécifiques simultanées mais également d'interdépendances des activités de maintenance. Les équipes locales d'exploitation et de maintenance interviennent sur les trois périmètres et la capacité à faire limitée crée cette interdépendance.



Fig. 2. Représentation d'un aménagement type de CNR

Tous ces éléments font de l'exploitation du Rhône un système complexe pour lequel CNR a développé un modèle de gestion unique.

C. Enjeu structurel

Les ouvrages des 18 aménagements de la concession sont constitués d'équipements de type électromécaniques, Génie-Civil. Ce sont des équipements qui nécessitent une mobilisation élevée de capitaux à l'investissement du fait de leur dimension importante et des compétences spécifiques nécessaires à leur conception. Par exemple, les 57 transformateurs, 81 alternateurs, 101 organes d'évacuations

de crue et les 85 turbines du parc ont une Valeur Actuelle de Remplacement (VAR) estimée à plus de 2.5 Mds € (en Euros 2020).

Aujourd'hui, une part non négligeable du parc est vieillissante et se situe dans sa phase de vie « mature ». Une quantité importante d'investissements est donc à prévoir dans les prochaines décennies.

De plus, les opérations de renouvellements de ce type d'équipements sont sur des temps longs, avec des durées de projets qui varient entre 2 et 5 ans, dépendants de la disponibilité des fournisseurs et des équipes de maintenance.

Enfin, le 28 février 2022, le Parlement et le Sénat ont voté la prolongation de la concession du Rhône à CNR jusqu'en 2041. En tant que concessionnaire, CNR a des obligations en matière de maintien en l'état du parc et il lui reste moins de 20 ans pour remplir sa mission.

La combinaison de ces facteurs à la fois humains, techniques, financiers et réglementaires mettent en évidence que la politique de maintien du patrimoine de la concession représente un enjeu structurel nécessitant la mise en place de stratégies long-terme adaptées.

D. Mise en place d'un système de Gestion d'Actifs

C'est dans ce contexte que CNR a créé en 2017 une entité dédiée à la mise en place de la Gestion d'Actifs basée sur la norme ISO 55000 [1]. Cette méthode de management a pour objectif de coordonner toutes les activités de l'entreprise afin d'extraire la valeur des actifs. Le déploiement d'un tel système vise à considérer l'ensemble du cycle de vie des actifs et de prendre en compte les risques associés à chaque décisions.

III. CAS D'APPLICATION

Une série de 22 alternateurs du parc, de même gabarit et de même technologie, nommée VA, a fait l'objet de la mise en place d'une stratégie pour les 20 prochaines années. Répartis sur 5 sites, ces alternateurs ont un âge moyen de 31 ans et leur durée de vie moyenne est estimée à 48 ans.

Pour définir les besoins en ressources et prioriser les remplacements, l'équipe d'Asset Management a réalisé des simulations prospectives basée sur la modélisation de l'Impact Economique Total d'un alternateur afin d'évaluer la période optimale de renouvellement de l'actif et des pénalités associées en cas de décalage des interventions.

La projection du cumul de ces pénalités sur le long terme a permis d'identifier les besoins pour permettre à CNR de lisser l'allocation de ressources nécessaire afin de faire face au mur d'investissement nécessaire au maintien des actifs mais également de prioriser les interventions.

Nous présenterons les résultats obtenus pour cette série d'alternateurs et les bénéfices que peut apporter la planification des investissements sur la gestion des ressources mais également sur le volet achat/approvisionnement.

A. Etat de l'art

La littérature sur des travaux d'évaluation de la fiabilité et la maintenabilité des alternateurs de sites de production hydroélectriques est assez fournie.

Côté fiabilité, de nombreux mettent en évidence qu'il est très complexe de déterminer la probabilité de défaillance de tels équipements. En cas de panne, il s'agira de déterminer si la machine électrique peut être remise en service (en fonction

de critères techniques et économiques) ou s'il est nécessaire de la remplacer. Le cas d'actifs similaires a été traité par Sumner en 2008 [2]. L'auteur y détermine les durées de vie grâce aux distributions de Weibull.

Toutefois, identifier les meilleures actions de maintenance ne peut être réalisé sans des experts, informés des défaillances possibles et des symptômes associés. Des outils ont été développés [3] pour le cas des alternateurs.

La société HYDROQUEBEC a fait partie des précurseurs dans le développement de tels outils. L'approche proposée est basée sur l'analyse du processus de dégradation. Des arbres causaux sont construits et font apparaître une séquence d'états débutant par une cause et se terminant par un mode de défaillance [4].

Un autre papier publié par la même équipe de recherche très récemment [5] a permis d'illustrer une approche de maintenance prédictive pour un équipement complexe tel qu'un alternateur. Les résultats ont montré que le modèle permet de prévoir des actions de maintenance spécifiques en fonction de la panne.

Cependant, nous n'avons pas connaissance de travaux combinant ces méthodes et outils dans un processus décisionnel structuré afin d'établir une stratégie long-terme.

Les travaux de l'équipe d'asset management de CNR visent ainsi à lever le verrou associé au développement d'une méthode d'aide à la décision relative aux investissements à effectuer de manière prioritaire. Il s'agit effectivement de garantir la prise de décision objective, en tenant compte de tous les risques et d'identifier les besoins en ressources humaines, techniques et financières.

B. Etat des lieux des alternateurs de groupes bulbes de la série VA

Les groupes bulbes sont situés à l'intérieur du conduit d'eau de la centrale hydroélectrique comme illustré en jaune sur la figure 3. Ce positionnement rend les opérations de maintenance lourde, notamment celles qui nécessitent un démontage, très longues en temps et sollicite une équipe de mainteneurs complète.

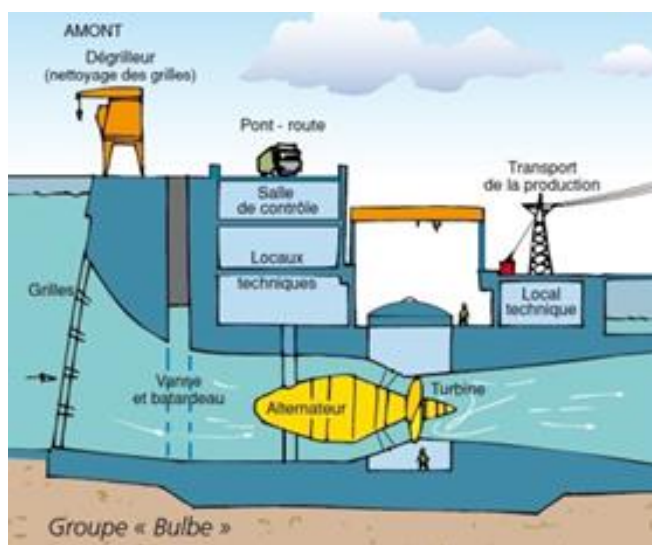


Fig. 3. Illustration d'un groupe Bulbe

Ce type de groupes, illustrée sur la figure 4, se caractérise par un empilement des éléments de l'alternateur (stator, rotor,

circuit magnétique, etc.) dans un environnement étroit, faute d'espace, mais également confiné et pressurisé afin de garantir l'étanchéité.

Du fait de ces spécificités, les alternateurs de groupes bulbes sont les plus chers du parc avec une VAR, du parc d'actifs de la série VA, estimée à plus de 130 M€ (€2020).

La durée de vie moyenne de cette technologie d'alternateurs est estimée, par les modèles CNR, à environ 48 ans dont plus de 70% auront dépassé cet âge d'ici 2041.

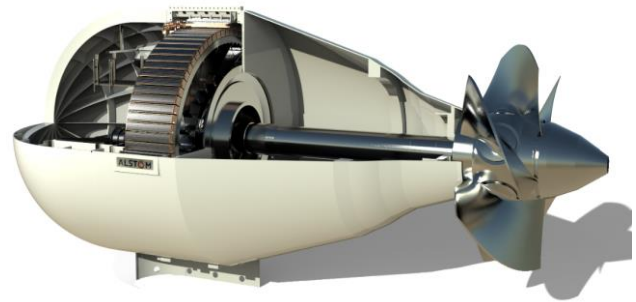


Fig. 4. Vue d'un alternateur dans un groupe Bulbe

Les délais observés pour un projet de reconstruction d'un alternateur de groupe bulbe sont les suivants :

- La phase d'approvisionnement est comprise entre 13 et 19 mois selon la disponibilité des équipes projets pour la phase d'étude et des fournisseurs
- La phase de démontage est une opération de manutention conséquente d'une durée de 4 mois, de la consignation totale du conduit d'eau au défilage complet du groupe bulbe nécessaire pour accéder à l'alternateur.
- La phase de reconstruction est une opération délicate nécessitant des compétences techniques spécifiques pour une durée de 8 mois. Cette opération est exécutée sur place ne peut être réalisée en temps masqué.
- La phase de remontage est d'une durée équivalente à l'opération de démontage (4 mois), à laquelle s'ajoute une période d'essais de 1 mois, pour la remise en exploitation du groupe.

La capacité à faire des équipes de maintenance pour ce type d'opérations sont les suivantes :

- CNR dispose d'équipes localisées sur la vallée réparties géographiquement sur 5 zones
- Le dimensionnement des équipes ne permet pas de réaliser simultanément plusieurs opérations de démontage/remontage des groupes
- L'opération ne peut être réalisée que sur place. L'espace restreint sur les sites ne permet pas d'en réaliser plusieurs simultanément.

Ainsi, au regard de toutes ces contraintes, l'immobilisation d'un groupe de production est de 17 mois minimum, lorsqu'elle est bien anticipée, mais peut aller jusqu'à 36 mois en cas d'avarie.

Un groupe de production d'un aménagement CNR à deux fonctions principales : produire de l'électricité et permettre l'écoulement du débit. Ces fonctions principales sont directement liées à deux des objectifs principaux de l'entreprise : assurer la disponibilité de l'outil de production et celle des ouvrages sûreté. De ce fait, son indisponibilité compromet la capacité de l'entreprise à l'atteinte de ces objectifs. L'alternateur étant un constituant principal du groupe de production, la durée d'immobilisation, anticipée ou non, pour sa reconstruction, constitue donc un risque majeur, nécessitant une politique de gestion adaptée.

C. Problématique d'approvisionnement

La phase d'approvisionnement étant le principal constituant du risque associée à une opération de renouvellement d'un alternateur, une veille sur le marché des groupes turbo-alternateurs hydroélectrique au niveau mondial a été réalisée afin d'évaluer le risque auquel s'expose CNR.

Il ressort de cette veille que le nombre de fournisseurs principaux est assez limité. En effet, il y a 16 fournisseurs « majeurs » dans le monde capables de répondre au besoin CNR dont 3 seulement en Europe pour un marché en 2019 évalué à 7.3 Mds \$ (\$2020) [6].

Le parc mondial de turbo-alternateurs hydroélectrique est vieillissant au même titre que les équipements CNR. L'essentiel de la capacité mondiale a été construite avec un rythme d'environ 20 GW/an depuis la fin des années 50 [7], période à laquelle les aménagements de la concession ont été conçus.

La hausse de la demande en Asie, notamment en Inde, combinée à la hausse des besoins de remplacements à venir sur le parc existant représentent une croissance du marché estimée à plus de 3% par an sur la période 2020 à 2027.

Sachant que les capacités de maintenance actuelles de CNR sont limitées à 1.3 unités par an, le besoin pour cette série d'alternateurs représente seulement 0.2% de la demande mondiale pour les 7 prochaines années.

Le risque lié à la hausse des délais fournisseurs, principal constituant de la durée d'immobilisation d'un alternateur, n'est pas négligeable et pourrait entraîner des conséquences bien au-delà de celles envisagées jusqu'à présent.

C'est ainsi que l'équipe d'Asset Management de CNR s'est vu solliciter afin de mener les analyses nécessaires et d'intégrer la composante risque dans les prises de décisions.

IV. MÉTHODOLOGIE

A. Simulation prospective

Afin de définir les orientations stratégiques à mettre en œuvre en matière de politique de maintenance du parc d'actifs de la concession, CNR a développé une approche issue de la recherche opérationnelle. Cette démarche consiste à créer une réplique numérique simplifiée de la chaîne de valeur du système d'exploitation et maintenance des infrastructures CNR. Cette réplique, à laquelle est prêtée le terme marketing de « Digital Twins » permet aux équipes d'Asset Management de réaliser des simulations prospectives des différentes politiques de maintenance envisageables et d'apprécier le risque que comporte chaque décision.

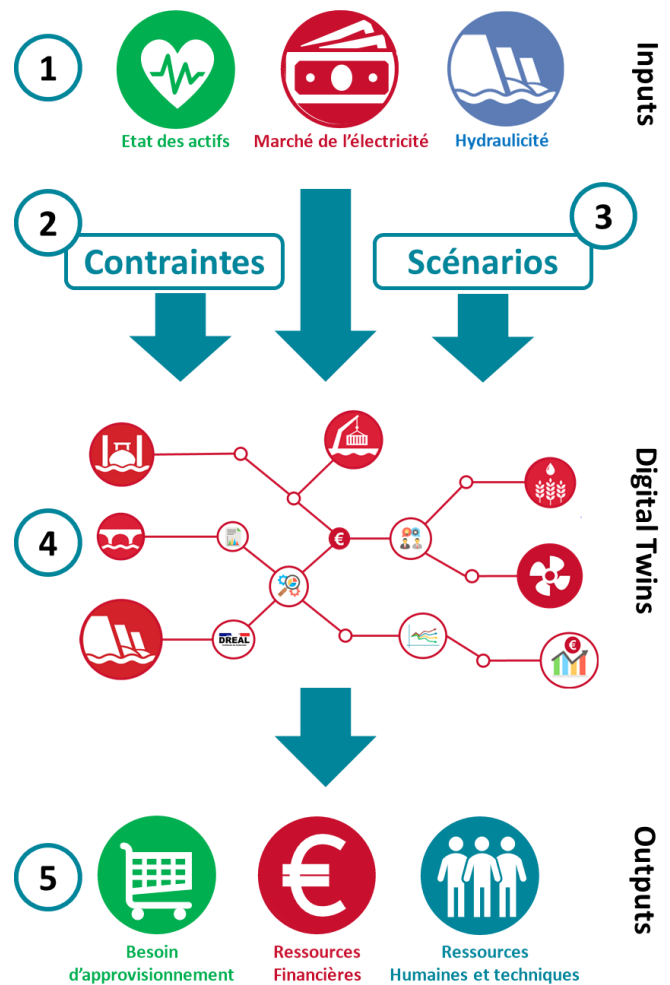


Fig. 5. Processus de simulation prospective

Le processus se déroule en 5 étapes illustrées en figure 5 :

- La préparation et la modélisation des données d'entrées qui caractérisent la famille d'actifs traitée.
- La modélisation séquentielle de la chaîne de valeur, notamment des contraintes d'exploitation, de maintenance et de l'interdépendance cinématique des actifs.
- La définition des scénarios de politique de maintenance à analyser (réactif, proactif, doublement des capacités à faire, etc.).
- La simulation stochastique.
- L'analyse des résultats.

B. Préparation des données d'entrée

Comme expliqué précédemment, le vieillissement des actifs, le débit et le prix de marché sont les trois principales variables d'entrée qui influencent la performance de l'entreprise et sa capacité à extraire de la valeur des actifs.

La prospective consiste à représenter la connaissance collective du présent et de la projeter dans le futur afin d'en mesurer les effets.

Les données d'entrée sont donc au préalable projetées dans le temps afin de donner une dynamique temporelle à l'analyse prospective pour apprécier les trajectoires que

peuvent prendre chaque scénarios définis. L'intérêt de cette dynamique temporelle est mis en évidence sur la figure 6 qui illustre un profil type de quantile de débit observé sur chaque aménagement. L'effet de la saisonnalité des débits du Rhône est bien marqué par une période où les apports hydrauliques sont plus faibles, que l'on retrouve chaque année à la même période. Mais également une volatilité très élevée le reste de l'année. Le même exercice est réalisé pour les données de prix de marché et représenté sur la figure 7.

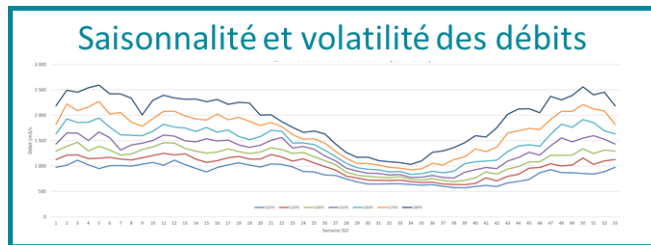


Fig. 6. Projection des données de débit d'un aménagement type

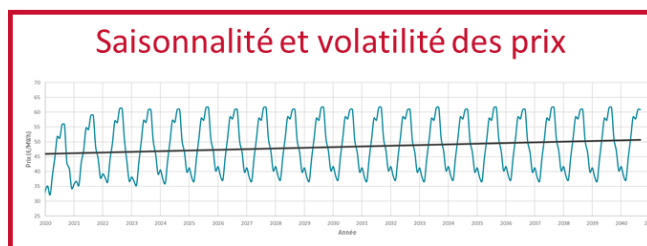


Fig. 7. Projection des prix de marchés

Cette connaissance collective du présent que l'on souhaite projeter nécessite d'être la plus exhaustive possible en combinant à la fois les observations de phénomènes passés, répertoriés dans les bases de données, avec l'expérience et l'expertise des sachants de l'entreprise.

Pour les débits et les prix de marchés, une quantité élevée d'observations est disponible. Les historiques sont suffisamment fournis pour produire des modèles statistiques. L'expertise des sachants, qui complète cette connaissance collective du présent, est surtout utilisée pour critiquer les modèles mais également représenter des évolutions qui ont rarement, voire jamais, été observées comme l'effet du dérèglement climatique sur les débits ou les périodes de tensions sur les marchés (COVID19, changement climatique, conflit géopolitique, etc.).

En ce qui concerne l'évolution de l'état des actifs, le constat est différent. Les bases de données ne sont pas autant fournies. Les actifs qui composent la concession sont des équipements avec des durée de vie très longues, allant d'une dizaine d'années pour les équipements de type automates programmable, etc. à plus de 100 ans pour des équipements de vannellerie et même plus de 250 ans pour les digues. De ce fait, même avec un système de suivi structuré comme une GMAO, très peu d'événements ont été observés jusqu'à présent, limitant les possibilités de modélisation statistique. C'est le cas pour la série des 22 alternateurs étudiés ou seulement 4 actifs de la population ont été reconstruits depuis les premières mises en service dans les années 70. L'expérience et la connaissance des experts de l'entreprise permet ainsi de compenser ce manque d'informations en apportant des éléments supplémentaires pour modéliser le vieillissement des actifs et leur probabilité de survie associée. La figure 8 est une illustration des modèles d'analyse de survie développés par les

équipes CNR. Ces modèles combinent les observations et la connaissance des experts en s'appuyant sur des méthodes mathématiques telles que la méthode Bayésienne.

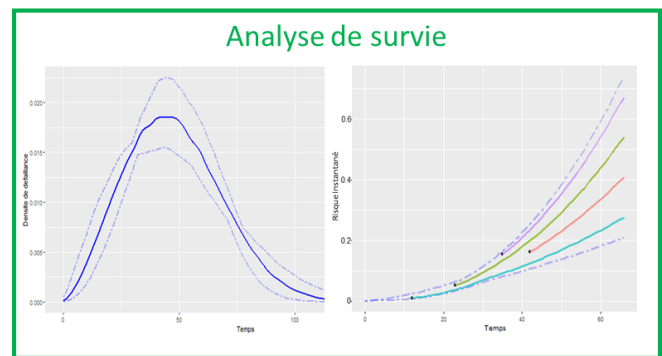


Fig. 8. Densité de probabilité et projection du taux de renouvellement instantané

C. Modélisation des contraintes

La seconde étape consiste à traduire la chaîne de valeur du système d'exploitation et maintenance auquel appartiennent les actifs traités.

Pour se faire, les processus de gestion qui constituent cette chaîne de valeur ont été analysés afin de ne retenir que les étapes dimensionnantes que l'on retrouve à chaque application de simulation prospective, permettant de favoriser la répliquabilité des algorithmes développés. De cette analyse ressort une séquence de 4 éléments :

- Modélisation de la fiabilité
- Modélisation de la maintenabilité
- Modélisation de la disponibilité
- Modélisation de l'hydraulique et évaluation des conséquences sur l'exploitation.

Cette séquence est appliquée à chaque pas de temps sur l'horizon complet de la simulation.

Dans le cas des alternateurs, la simulation est réalisée au pas de temps annuel et pour chaque pas, la séquence est la suivante :

- Calcul du nombre d'alternateurs défectueux sur l'année en fonction du modèle de survie et de l'état de chaque individu.
- Calcul du besoin en ressource pour la réalisation des opérations de renouvellement comme la sollicitation des équipes de maintenances, la capacité des fournisseurs, etc.
- Calcul de la disponibilité. En fonction des contraintes de fournisseurs, de la capacité à faire des équipes de maintenance et des contraintes techniques propres à chaque site, un ordonnancement des opérations de renouvellement est établi. Une liste d'attente est créée lorsque les capacités sont dépassées, prolongeant ainsi la durée d'indisponibilité de l'équipement.

D. Définition des scénarios

Les scénarios de politiques de maintenance envisagées dans la simulation sont propres au sujet traité. 2 scénarios de politique sont présents à chaque simulation : le scénario

préventif et le scénario correctif. Ensuite, selon le sujet, d'autres scénarios de politique de maintenance peuvent être envisagés, comme l'augmentation de l'effectif, la mise en place de stock de pièces de rechange, etc.

Dans le cas des alternateurs, les scénarios étudiés sont les suivants :

- Scénario réactif : proche d'un scénario correctif dans le sens où il n'y a pas de programmation anticipée du remplacement. L'intervention est décidée lorsque que des signes précurseurs mettent en évidence un risque élevé d'avarie. C'est une gestion de type « projet par projet », sans prise en compte des besoins futurs pour le groupe d'alternateurs. Ce scénario correspondant à la politique CNR pendant la phase de vie utile du parc, période pendant laquelle, le volume des demandes de renouvellement était faible.
- Scénario proactif. C'est un scénario préventif conditionnel individuel optimisé. Le remplacement est programmé pour être réalisée juste au moment où la défaillance est imminente.
- Scénario Mixte. C'est un scénario avec une première phase permettant de traiter les besoins, en hausse, cumulés sur un horizon moyen-terme. Suivi d'un retour vers un scénario réactif.
- Scénario proactif à capacité doublée. Ce scénario ayant pour objectif d'apprécier l'influence de la capacité à faire des équipes de maintenance sur l'atteinte des objectifs.

E. Environnement stochastique

La simulation prospective est réalisée dans un environnement stochastique. Le chiffre d'affaires étant hyper volatile (cf II.A), un environnement déterministe ne permet pas d'évaluer toutes les possibilités, notamment la combinaison d'événements favorables comme défavorables et certaines situation extrêmes.

La simulation stochastique est réalisée avec la méthode de Monte Carlo. Cette méthode a plusieurs avantages :

- Elle permet d'apprécier la sensibilité des résultats aux données d'entrée.
- Elle permet de mettre en évidence des situations inattendues par la combinaison d'événements et d'en mesurer les effets.

Cette méthode a mis en évidence que le manque à gagner, que représente l'indisponibilité du premier groupe sur un site, est limité, même les années avec une hydraulicité bien au-dessus de la moyenne. Elle a également mis en évidence que la probabilité de cumuler des indisponibilités avec des arrêts de groupes sur plusieurs années, le temps de réaliser les opérations, est significative au regard de l'âge actuel du parc d'alternateurs.

F. Analyse des résultats

Le premier niveau d'analyse des résultats est porté sur le triptyque : risque, coût, et performance. L'objectif étant d'apprécier les scénarios permettant d'extraire un maximum de valeur pour l'entreprise. D'identifier la politique contribuant le plus à atteindre les objectifs de Gestion d'Actifs.

Le second niveau d'analyse doit fournir les informations nécessaires aux entités de l'entreprise, qui vont mettre en œuvre la politique actée par l'instance de gouvernance. L'analyse est portée sur des éléments plus techniques, dans le langage propre à chaque partie prenante :

- Les Ressources Humaines avec une vision sur les besoins de recrutement
- Les Achats/Logistiques avec une vision sur les besoins en approvisionnement
- La Maintenance avec une vision sur le volume d'opérations à venir et la cadence à opérer
- La Finance avec une vision des besoins en investissements
- L'Exploitation avec une vision sur la disponibilité de l'outil de production
- Etc.

V. CONCLUSIONS

A. Problématiques mises en évidence pour la politique de maintenance du groupe d'alternateurs

Le premier niveau d'analyse des résultats obtenus pour les alternateurs a mis en évidence les éléments suivants :

- Entre 65 et 75% du parc d'alternateur sera à renouveler d'ici à 2041 selon le scénario.
- **Le risque** à $\pm 2\sigma$ du scénario réactif est valorisé à un montant compris entre 0.8 et 2 fois la VAR du parc d'alternateurs. La figure 9 permet d'apprécier ce risque moyen pour chaque scénario et notamment que celui du scénario réactif est 2 fois plus élevé que les autres.

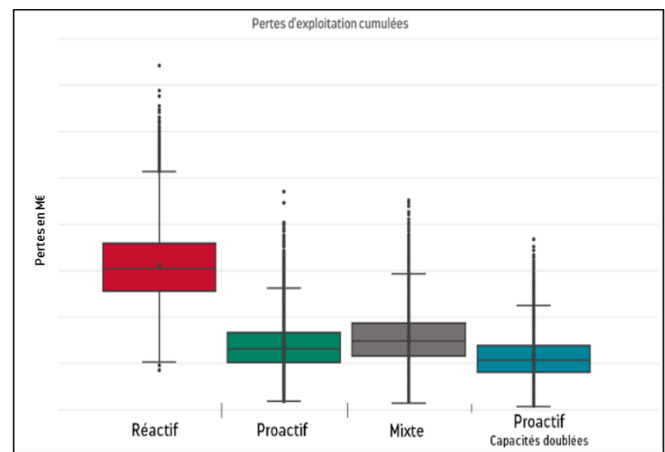


Fig. 9. Processus de simulation prospective

- **Le coût** du scénario réactif est inférieur aux autres scénarios avec 5 à 6 unités de moins à renouveler. Cet écart correspond au coût de l'effet de réduction sur le risque, d'une politique proactive, permettant de le réduire d'un facteur 2 comme précisé dans le point précédent. Cette analyse met en évidence qu'une politique proactive entraînera un effort d'investissements supplémentaires estimé à 25-30% de la VAR du parc. Mais que cet effort supplémentaire permettra de réduire l'exposition au

risque de 60% de la VAR du parc par rapport à la politique actuelle.

- **La performance** d'une politique proactive se mesure par un gain du taux de disponibilité global des groupes de production d'environ 0.6%/an.

Le second niveau d'analyse des résultats obtenus à mis en évidence les éléments suivants :

- **La Capacité à faire** des équipes de maintenance ne permet pas de répondre au besoin. Avec un taux d'utilisation supérieur à 200% de 2024 à 2030 de cette capacité, apprécié sur la figure 10. Un doublement de la capacité permet de limiter ce taux d'utilisation à 72% sur le même horizon.

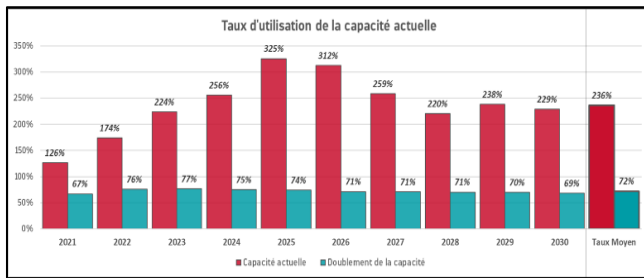


Fig. 10. Processus de simulation prospective

- **Les délais d'approvisionnement** étant très longs, la disponibilité et la capacité limitée des fournisseurs ressort comme étant le second facteur limitant avec plus 26% du risque total.

B. Actions et bénéfices de la nouvelle politique

L'identification des facteurs qui influencent les résultats a permis de comprendre les faiblesses de la politique de maintenance actuelle et de déclencher les corrections nécessaires pour garantir la pérennité du système sur le long-terme. Les principales actions de corrections et les bénéfices espérés de la nouvelle politique décidée, à l'issue de la simulation pour les alternateurs de la série VA sont les suivantes :

- **Capacité à faire** : grément de ressources supplémentaires pour la maintenance et périmètre d'intervention des équipes élargi.
- **Approvisionnement** : mise en place d'un contrat d'approvisionnement sur un horizon plus long pouvant aller jusqu'à 10 ans. Ce contrat a permis de sécuriser la disponibilité des fournisseurs et de réduire les coûts d'approvisionnement.

Sur le plan de la performance, pour les 20 prochaines années, la mise en œuvre des nouvelles orientations

stratégiques implique une augmentation des investissements de plus de 50% par rapport à l'ancienne politique mais permettra à CNR d'en diminuer son impact sur l'EBITDA d'environ 40%.

C. Bénéfices et perspectives de la Gestion d'Actifs

Pour conclure, cette nouvelle approche permet de projeter la politique de maintenance de l'entreprise sur le long-terme, composée à la fois des coûts, des risques et de la performance. Elle favorise la prise de recul sur la politique actuelle, apporte des éléments permettant de consolider le processus de décision et de conforter les instances d'arbitrages sur les choix à opérer.

Elle favorise également la prise en compte du risque et d'identifier les leviers d'améliorations en amont du processus, dès la phase de conception, notamment sur les choix techniques pour l'ingénierie et les exigences contractuelles pour le service achat.

Son application à toutes les familles d'actifs critiques de la concession permettra d'évaluer et de lisser le besoin en ressources humaine, technique et financières, sur le long-terme.

Enfin, appliquée à un horizon moyen-terme et avec une connaissance plus approfondie des actifs, elle permettra d'accompagner les asset managers dans la construction de la déclinaison des orientations stratégiques notamment pour la programmation pluriannuelle et l'ordonnancement des opérations.

REFERENCES

- [1] C.Sumereder, "Statistical lifetime of hydro generators", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 15, Issue 3, June 2008.
- [2] N.Amyot, C.Hudon, M.Lévesque, M.Bélec, F.Brabant and C.St-Louis, "Development of a Hydrogenerator Prognosis Approach". CIGRE paper A1-202, 2014
- [3] O.Blancke, N.Amyot, C.Hudon, M.Lévesque and A.Tahan, "New Generic Approach to Convert FMEA in Causal Trees for the Purpose of Hydro-Generator Rotor Failure Mechanisms Identification", Annual Conference of the Prognostics and Health Management Society, San Diego, CA, US, 2015
- [4] O.Blancke et al., "Predictive Maintenance Approach for Complex Equipment Based on Petri Net Failure Mechanism Propagation Model", European Conference of the Prognostics and Health Management Society, 2018.
- [5] ISO 55000:2014. "Gestion d'actifs – Aperçu général, principes et terminologie", International Organization for Standardization
- [6] COHERENT MARKET INSIGHTS, "Hydro Turbine Generator Unit Market Analysis", CMI4432, 2021
- [7] S.Law, N.Troja, "Hydropower growth and development through the decades", International Hydropower Association, 2019.