

ANALYSE DU RETOUR D'EXPERIENCE DES PROTECTIONS NUMERIQUES, COMPARAISON ENTRE SURETE DE FONCTIONNEMENT PREVISIONNELLE ET OPERATIONNELLE, IMPACT SUR LA MAINTENANCE

David POTIER - Frédéric VAILLANT
Schneider Electric
Département Protection et Contrôle des Réseaux
Service Développement de l'Offre
38050 GRENOBLE Cedex 9 - FRANCE

RESUME

Après un rappel des principales définitions de la sûreté de fonctionnement, l'article présente le besoin de retour d'expérience et le processus global d'analyse des données de retour d'expérience d'un parc important de protections numériques de Schneider Electric. L'analyse des données du retour d'expérience n'est pertinente et significative que si la collecte des informations relatives aux pannes en clientèle est fiable et ordonnée. Lorsque cette condition est respectée, une analyse systématique et détaillée des pannes permet une comparaison entre les résultats opérationnels et ceux que la théorie avait prévus. Les méthodes de calcul de fiabilité prévisionnelle généralement pessimistes sont ainsi "recalées" pour obtenir des chiffres plus réalistes. Enfin, l'exploitation des données de retour d'expérience permet au constructeur de proposer à un exploitant une démarche d'Optimisation de la Maintenance par la Fiabilité (définition d'une politique de maintenance et dimensionnement d'un stock de pièces de rechange).

INTRODUCTION

La qualité et la disponibilité de l'énergie électrique distribuée sont très dépendantes de la fiabilité des équipements de protection. En 1985, d'après une étude statistique réalisé par un distributeur [1], les défaillances des systèmes de protection ou de contrôle commande représentaient 50% des pannes de postes HT/MT provoquant des coupures d'électricité de leurs abonnés. L'introduction de la technologie numérique dans les protections a permis de mieux maîtriser leur sûreté de fonctionnement et donc de limiter le nombre de coupures d'électricité dues aux protections.

Les protections électromécaniques nécessitent des tests fonctionnels complets et réguliers pour s'assurer de leur bon fonctionnement, par contre les protections numériques disposent de fonctions d'autosurveillance (autotests) qui permettent de détecter rapidement leur indisponibilité, de limiter et d'espacer les actions de maintenance périodique. Ces autotests doivent être spécifiés dès le début de la conception à partir des résultats d'études de sûreté de fonctionnement prévisionnelle.

Ces études sont généralement basées sur des hypothèses concernant les conditions de fonctionnement des protections et les modes de défaillance des composants électroniques. L'analyse des données de retour d'expérience permet de vérifier ces hypothèses mais surtout de calculer le taux de défaillance opérationnel des protections qui est indispensable pour engager une démarche d'Optimisation de la Maintenance par la Fiabilité (OMF).

RAPPEL DES DEFINITIONS DE LA SURETE DE FONCTIONNEMENT

La sûreté de fonctionnement regroupe principalement trois définitions qui appliquées aux équipements de protection sont les suivantes:

La fiabilité d'une protection correspond à son aptitude à accomplir sa (ou ses) fonction(s), dans les conditions d'utilisation spécifiées par le constructeur et pendant un intervalle de temps donné. (La fonction principale d'une protection est de donner un ordre de déclenchement au disjoncteur uniquement lorsqu'un défaut est présent sur le réseau).

La maintenabilité d'une protection correspond principalement à son aptitude à être facilement réparable lorsque les agents de maintenance disposent des moyens prescrits par le constructeur.

La disponibilité d'une protection correspond à son aptitude à être en état d'accomplir sa (ou ses) fonction(s) dans les conditions d'utilisation spécifiées par le constructeur et à un instant donné.

BESOIN DE RETOUR D'EXPERIENCE

Le retour d'expérience remplit un besoin bien précis qui peut être caractérisé par 3 principales actions [2]:

Mémoriser : le retour d'expérience est la mémoire des incidents vécus que l'on ne souhaite pas voir se reproduire. Cette mémoire servira donc principalement à améliorer le

comportement des produits. Pour cela elle se matérialise généralement par une base de données structurée pour restituer uniquement des informations utiles et de qualité.

Analyser: une base de donnée constitue généralement une mine d'informations mais qui devient vite inutilisable si elle n'est pas associée à une analyse simple répondant à des besoins. Cette analyse doit proposer un résultat synthétique sur le comportement du matériel en faisant souvent appel aux techniques statistiques.

Transmettre: plusieurs personnes intervenant pendant la vie du produit sont concernées par les données de retour d'expérience. La transmission régulière de synthèses d'analyse de retour d'expérience leur permettra d'intégrer ces données précieuses dans leur méthodes de travail.

PRESENTATION DU RETOUR D'EXPERIENCE DES PROTECTIONS NUMERIQUES D'UN CONSTRUCTEUR

La figure 1 présente le principe global du retour d'expérience des protections numériques. Le constructeur, le client utilisateur et les équipes de SAV ou de maintenance sont les principaux intervenants dans le retour d'expérience.

Les agents de maintenance ont un rôle prépondérant car ils collectent toutes les informations relatives aux pannes des produits. Leur mission principale étant de rendre le produit de nouveau disponible, il est indispensable de leur faciliter la tâche de collecte d'informations pour avoir un retour d'expérience significatif. Pour cela ils disposent d'une fiche "Constat de panne" (créée par les exploitants des données

de retour d'expérience) facile à remplir et adaptée aux produits. Cette fiche accompagne le produit défaillant qui est retourné au constructeur pour analyse technique systématique.

L'expérience montre que l'étape de collecte d'informations est la plus importante dans le retour d'expérience. C'est pourquoi il est indispensable de sensibiliser les agents de maintenance sur l'importance de remplir correctement et systématiquement les fiches "Constat de pannes".

Après réception et analyse technique des produits défaillants, toutes les informations relatives à la même panne sont enregistrées dans une base de données.

EXPLOITATION DES DONNEES DU RETOUR D'EXPERIENCE

Avec un parc de plus de 50000 protections numériques et des procédures de collecte d'informations validées, l'exploitation de la base de données permet d'obtenir des résultats pertinents et significatifs.

L'analyse des données de retour d'expérience permet principalement:

- de connaître la répartition des causes de panne des protections numériques (diagramme de Pareto),
- de calculer un taux de défaut en fonction des périodes de fabrication (courbes isochrones),
- de mieux connaître les modes de défaillance des composants électroniques,
- de calculer la fiabilité opérationnelle des protections (taux de défaillance opérationnel accompagné d'un intervalle de confiance).

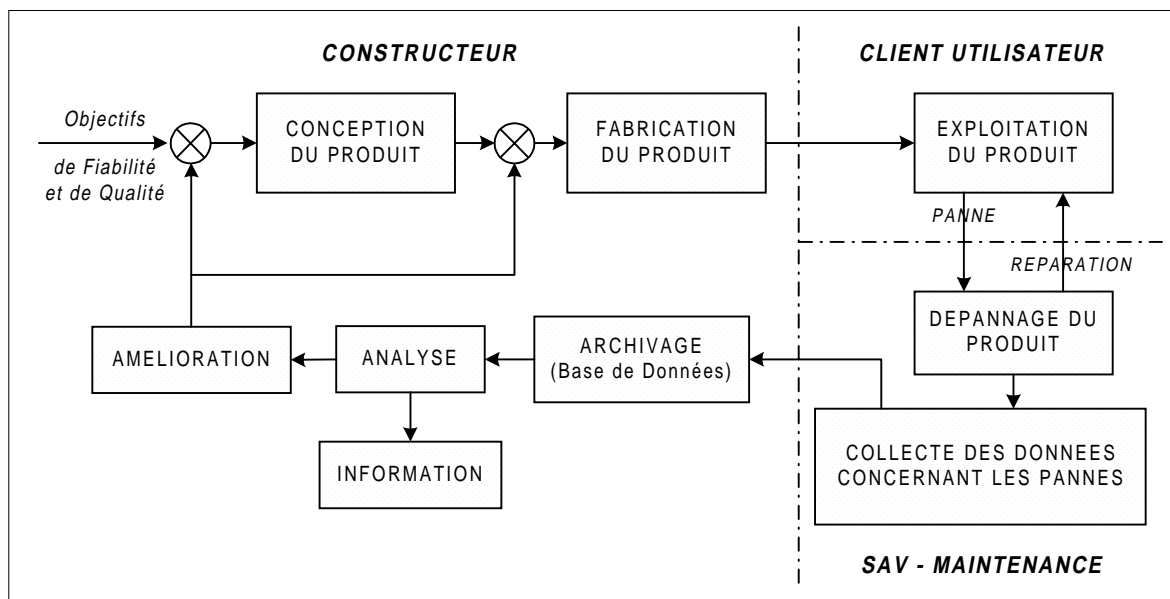


Figure 1: Principe du retour d'expérience des protections numériques d'un constructeur

Tous ces résultats permettent de valider les études de sûreté de fonctionnement réalisées systématiquement dès le début de la conception des protections et confirment tout leur intérêt. Par exemple le retour d'expérience (en plus des résultats des tests de validation des protections) montre l'intérêt des fonctions d'autosurveillance (autotests) qui détectent rapidement les défaillances les plus critiques et évitent ainsi un fonctionnement intempestif.

La connaissance de la répartition des causes de défaillance des produits en exploitation permet aux concepteurs de les modifier si nécessaire pour supprimer les premières causes de défaillance, mais aussi d'améliorer la conception des futurs produits.

Calcul de fiabilité opérationnelle

La fiabilité opérationnelle $R(t)$ d'un matériel électronique correspond à une probabilité de bon fonctionnement et se calcule simplement avec la relation suivante:

$$R(t) = \exp(-\lambda.t) \quad (1)$$

avec t = temps de fonctionnement,
 λ = taux de défaillance opérationnel.

Le taux de défaillance opérationnel d'un produit est estimé à partir des données de retour d'expérience d'un parc de n produits identiques.

Si T est le temps de fonctionnement cumulé des n produits et r le nombre de défaillances observées sur ce parc alors le taux de défaillance est égal à:

$$\hat{\lambda} = \frac{r}{T} \quad (2)$$

Ce taux de défaillance correspond donc à un nombre moyen de défaillances par unité de temps.

Cette grandeur n'étant qu'une estimation du taux de défaillance réel du produit, il est important de savoir si elle est représentative et significative. Pour cela il est indispensable de l'accompagner d'un intervalle de confiance dont les bornes λ_- et λ_+ sont calculées avec les relations suivantes:

$$\lambda_- = \frac{\text{inv}\chi^2[1 - (\alpha / 2) ; 2r]}{2T} \quad (3)$$

$$\lambda_+ = \frac{\text{inv}\chi^2[(\alpha / 2) ; 2r + 2]}{2T} \quad (4)$$

avec $\text{inv}\chi^2$: fonction statistique inverse du Khi2,
 $(1-\alpha)$: seuil de confiance.

Lorsque le nombre de défaillances est supérieur à 30, la loi du χ^2 devient assimilable à une loi normale centrée réduite et les expressions (3) et (4) deviennent:

$$\lambda_- = \frac{(\sqrt{r} - 0,82)^2}{T} \quad (3 \text{ bis})$$

$$\lambda_+ = \frac{(\sqrt{r+1} + 0,82)^2}{T} \quad (4 \text{ bis})$$

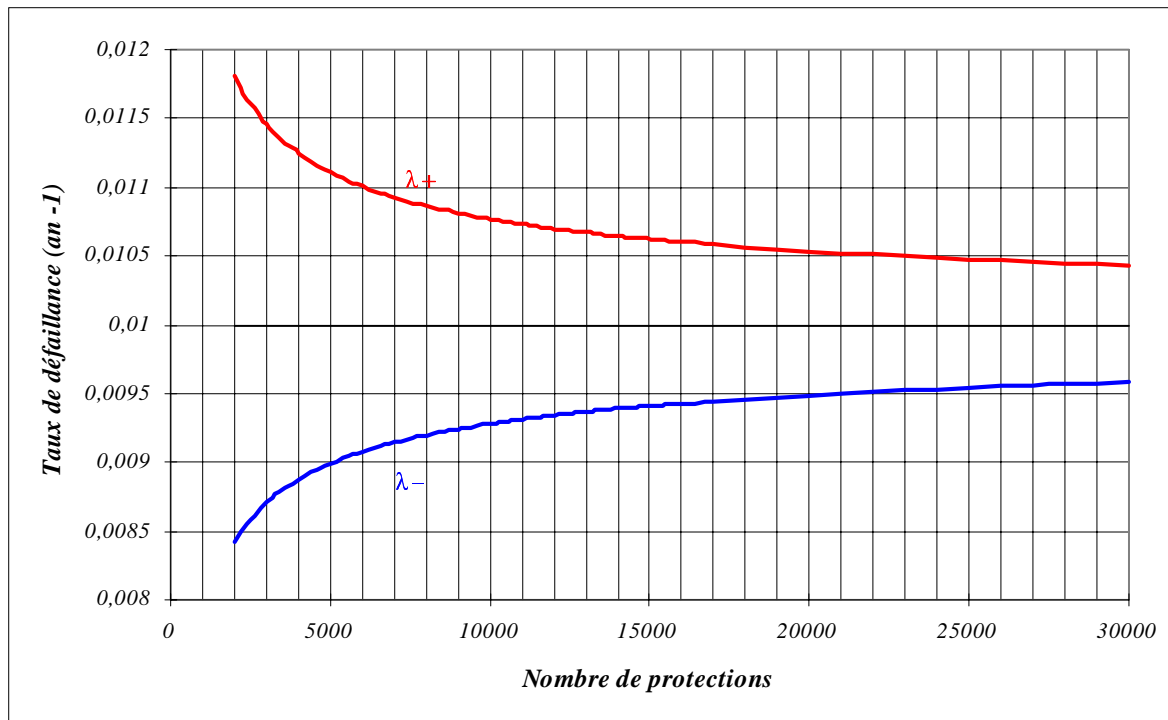


Figure 2: Evolution des bornes de l'intervalle de confiance à 90% en fonction du nombre de protections

Par exemple pour un seuil de confiance de 90%, l'intervalle de confiance permet d'annoncer que le taux de défaillance réel du produit a 9 chances sur 10 d'être compris entre λ_- et λ_+ . L'estimation d'un taux de défaillance est d'autant plus significative que les bornes de son intervalle de confiance sont proches.

Le graphique de la figure 2 montre que les bornes seront d'autant plus proches que le nombre de protections en exploitation est important. Les bornes λ_- et λ_+ ont été calculées avec des protections ayant un taux de défaillance de 10^{-2} /an et fonctionnant 5 ans, et en considérant que toutes les pannes sont comptabilisées.

Par exemple, lorsque le nombre de protections passe de 3000 à 30000, l'écart entre λ_+ et λ_- est divisé par plus de 3.

Comparaison des données de sûreté prévisionnelle et de sûreté opérationnelle

Les études de sûreté de fonctionnement réalisées pendant la conception des protections comportent au minimum une AMDE (Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets) et un calcul de taux de défaillance prévisionnel. L'AMDE permet principalement d'identifier les modes de défaillance des composants les plus critiques entraînant l'apparition d'événements redoutés, et les taux de défaillance permettent d'estimer le risque d'apparition de ces événements redoutés.

Le recueil de données de fiabilité MIL HDBK 217F permet de calculer le taux de défaillance de tous les composants électroniques constituant la protection en prenant en compte leurs conditions réelles d'utilisation (température ambiante moyenne, facteur de charge, courant, tension,...).

Comme certaines hypothèses de calcul (concernant la qualité des composants par exemple) peuvent conduire à des résultats plus ou moins pessimistes, il est indispensable d'étalonner la méthode de calcul de fiabilité prévisionnelle avec les données de retour d'expérience.

Le calcul des taux de défaillance opérationnels de différentes cartes électroniques de protections montre que les données prévisionnelles sont généralement pessimistes (d'un facteur de 5 à 10 en fonction du type de carte).

La prise en compte de ce facteur correctif lors de l'évaluation de la fiabilité d'une nouvelle protection permet donc d'obtenir une fiabilité prévisionnelle réaliste.

IMPACT SUR LA MAINTENANCE

Deux types de maintenance sont principalement effectués sur les protections numériques:

- Maintenance périodique: tests fonctionnels périodiques pour détecter les défaillances latentes.

Ce type de maintenance est indispensable pour les protections électromécaniques et doit se faire avec une périodicité de l'ordre d'un an pour minimiser les risques de non déclenchement de la protection sur défaut du réseau électrique. Pour les protections numériques les actions de maintenance périodique peuvent être beaucoup plus espacées dans le temps (5 ans par exemple). Elles

permettent de vérifier certaines parties des protections imparfaitement couverte par les autotests et sont souhaitables pour les protections numériques installées sur les réseaux nécessitant un haut niveau de sûreté (par exemple, réseau alimentant un process industriel continu n'acceptant aucune indisponibilité de l'énergie électrique).

- Maintenance curative: échange de la protection complète ou d'un de ses sous ensembles après constatation d'une panne (souvent détectée par les autotests).

Les données de l'analyse du retour d'expérience peuvent être utilisées pour optimiser ce dernier type de maintenance (Optimisation de la Maintenance par la Fiabilité). La maintenance curative est directement dépendante d'un lot de pièces de rechange dont le dimensionnement doit être le plus juste pour obtenir un bon compromis entre faible probabilité de rupture de stock et coût minimum.

Dimensionnement d'un lot de pièces de rechange

La constitution d'un stock de pièces de rechange est indispensable pour effectuer le plus rapidement possible une action de maintenance curative. Une rupture de stock peut entraîner une longue indisponibilité d'une protection, qui normalement est quasiment limitée au temps d'intervention de l'agent de maintenance.

Un surdimensionnement du stock permet d'éviter ce désagrément mais entraîne un fort surcoût de gestion. Pour obtenir un bon compromis il est possible de calculer une probabilité de non rupture de stock (P_{NRS}) en fonction du nombre de protections à maintenir, de leur taux de défaillance, de leur temps de fonctionnement et du nombre de pièces de rechange.

$$P_{NRS} = e^{-n \cdot \lambda \cdot t} \cdot \sum_{k=0}^p \frac{(n \cdot \lambda \cdot t)^k}{k!} \quad (5)$$

avec: P_{NRS} = Probabilité de Non Rupture de Stock,
 n = Nombre de protections à maintenir,
 λ = Taux de défaillance des protections,
 t = Temps de fonctionnement,
 p = Nombre de pièces de rechange.

Par exemple, un exploitant qui doit assurer la maintenance de 100 protections ($n = 100$) ayant toutes un taux de défaillance $\lambda = 2 \cdot 10^{-2}$ /an, peut dimensionner son stock de pièces de rechange en se fixant une probabilité de non rupture de stock et en connaissant la durée de réapprovisionnement. La relation (5) devient donc:

$$P_{NRS} = e^{-2t} \cdot \sum_{k=0}^p \frac{(2t)^k}{k!}$$

La figure 3 représente (pour l'exemple choisi) l'évolution de la P_{NRS} en fonction du nombre de pièces de rechange et du temps de fonctionnement des protections.

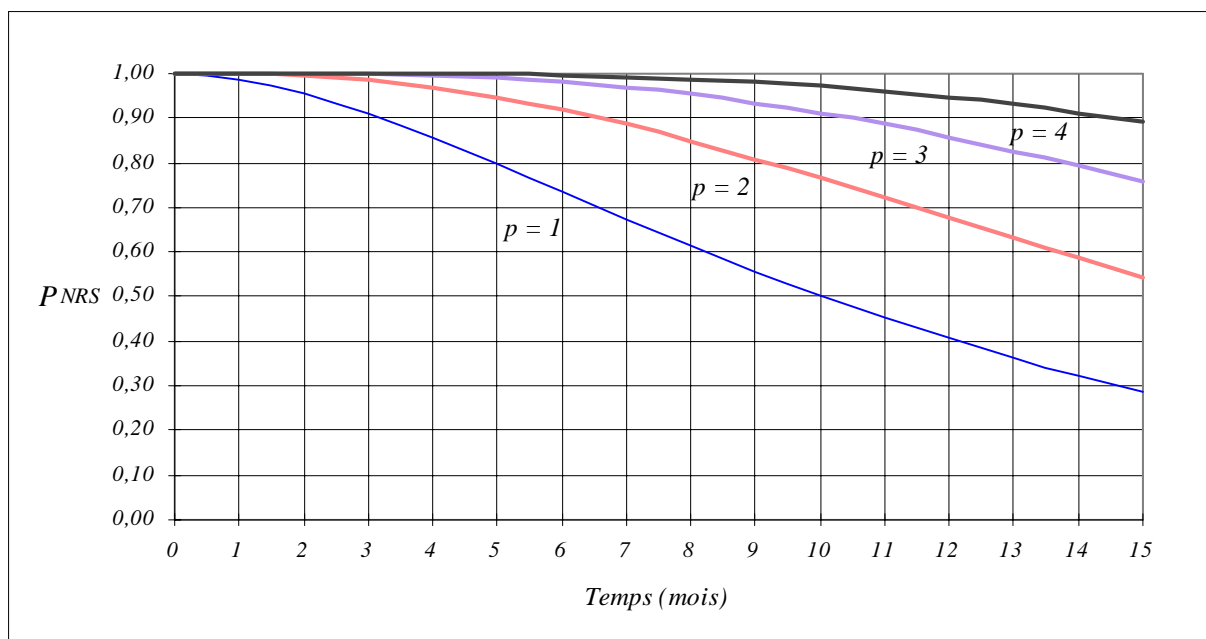


Figure 3: Evolution de la P_{NRS} en fonction du nombre de pièces de rechange et du temps de fonctionnement des protections

Le temps de fonctionnement des protections peut être assimilé à un temps de réapprovisionnement des pièces de rechange. Dans ce cas l'exploitant qui se fixe une P_{NRS} peut utiliser la figure 2 pour dimensionner son stock en fonction du délai de livraison des pièces de rechange.

Par exemple un exploitant qui se fixe une P_{NRS} de 95% (c'est à dire 5 % de risque d'avoir des problèmes de pièces de rechange) peut stocker qu'une seule protection pour assurer la maintenance curative de 100 protections si le délai de réapprovisionnement est inférieur à 2 mois. Avec la même P_{NRS} il devra stocker au moins deux protections uniquement si le délai de réapprovisionnement est supérieur à 5 mois.

Cet exemple montre qu'avec un délai de livraison des pièces de rechange assez court (1 à 2 semaines), il est possible de maintenir un parc de 100 protections identiques avec seulement une protection en stock (le risque de rupture de stock correspondant est inférieur à 0,5%).

Le risque de rupture de stock sera encore plus faible (inférieur à 0,1%) si la taille du parc de protections est limitée à quelques dizaines de produits et s'il est possible d'obtenir une protection de rechange en quelques jours.

Remarque: Le raisonnement de l'exemple précédent n'est valable qu'avec des protections rigoureusement identiques ou ayant une base matérielle commune (gestion d'un seul modèle). Si le parc est hétérogène, le raisonnement peut se faire au niveau des sous ensembles matériels communs avec un stockage des pièces de rechange chez l'exploitant ou mieux dans l'antenne SAV du constructeur la plus proche.

CONCLUSION

L'analyse des données de retour d'expérience des protections numériques est indispensable dans une démarche globale de sûreté de fonctionnement. Elle permet de valider les études de sûreté prévisionnelle réalisées pendant la phase de conception et d'estimer la fiabilité opérationnelle des protections (indispensable pour "étalonner" les méthodes de calcul prévisionnel souvent pessimistes). Cette analyse fournira des résultats fiables et significatifs uniquement si des procédures rigoureuses de collecte d'information relatives aux pannes en clientèle sont établies et utilisées correctement, et si le parc de protections en exploitation est suffisamment important.

Enfin les données de fiabilité opérationnelle sont indispensables pour engager une démarche d'optimisation de la maintenance par la fiabilité qui permet principalement de minimiser les coûts de stockage des pièces de rechange.

REFERENCES

- [1] Philippe CARER, Sandrine DUPRE, Jean Louis BON, *De la qualité de fourniture de l'électricité à la sûreté de fonctionnement des matériels: application aux matériels du réseau électrique d'EDF GDF SERVICES*, 11è Colloque National de Fiabilité et Maintainabilité $\lambda\mu 11$ (1998).
- [2] Jean AUPIED, *Retour d'expérience appliqué à la sûreté de fonctionnement des matériels en exploitation*, Collection de la D.E.R. d'E.D.F. - EYROLLES (1994).
- [3] Marielle LEMAIRE, Juan Carlos TOBIAS, "Reliability design approach for protection and control equipment for MV distribution network", in proceedings 1995 of the Second International Conference on the Reliability of Transmission and Distribution Equipment.
- [4] Marielle LEMAIRE, *Sûreté des protections MT et HT*, Cahier Technique MERLIN GERIN N°175 (1995).