

La maintenance dans l'évaluation des performances des systèmes de production : une approche par la simulation
Maintenance in performance evaluation of production systems: a simulation approach

F. Pérès¹, E. Caillaud² et D. Noyes¹

¹ Laboratoire Génie de Production
Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tarbes
47, avenue d'Azereix - BP 1629
65016 Tarbes Cedex
Tél. : (+33) 05 62 44 27 00 - Fax : (+33) 05 62 44 27 08
e-mail : paquito@enit.fr - noyes@enit.fr

² Ecole des Mines d'Albi Carmaux
Campus Jarlard, route de Teillet
81013 Albi Cedex 09 France
Tél. : (+33) 05 63 49 30 92 - Fax : (+33) 05 63 49 30 99
e-mail : caillaud@enstimac.fr

Thème

Management de la performance

Sous-thèmes

Management de la maintenance
Gestion de production

Mots clés / Keywords

Système de production, maintenance, gestion de production, simulation, évaluation de performance, aide à la décision.

Production system, maintenance, production management, simulation, performance evaluation, decision support.

Résumé /Summary

Nous proposons une démarche d'évaluation de performance de systèmes de production intégrant les effets directs des actions de maintenance. La méthode repose sur la définition d'indicateurs adaptés à la production et la maintenance et la modélisation des processus concurrents intervenant sur les ressources. Un logiciel de simulation est utilisé pour le traitement.

We propose a way of performance evaluation of the production systems taking into account the maintenance effects. The method relies on the definition of the production and maintenance indicators, and the modeling of concurrent processes which affect the resources. A simulation software is used for the treatment.

La maintenance dans l'évaluation des performances des systèmes de production : une approche par la simulation

Introduction

L'efficacité d'emploi des ressources de production et leur productivité résultent de l'adéquation entre les règles de gestion de la production et celles de la gestion de maintenance. L'analyse du système de production impose, quel que soit l'objectif de l'étude (performances, fiabilité, coûts,...), la prise en compte simultanée des processus de production et de maintenance.

Dans ce contexte, nous proposons une méthode d'évaluation des performances des systèmes de production en intégrant les défaillances et les politiques de maintenance.

L'exposé est organisé en trois parties.

Après avoir résumé la situation de la fonction maintenance par rapport à la fonction de production, nous présentons dans la première partie, les indicateurs de performance intégrant les paramètres essentiels des deux fonctions. Ces indicateurs sont destinés à l'évaluation de la performance du système de production mais aussi du service de maintenance.

Nous développons la voie de la simulation dans la deuxième partie. Nous présentons les éléments de la maintenance qui doivent être pris en compte dans la simulation. Les éléments constitutifs du modèle sont détaillés. Nous présentons dans cette partie les moyens utilisés pour intégrer la maintenance en simulation alors que les logiciels de ce type ne proposent pas de fonctionnalités dédiées.

Nous illustrons cette démarche dans la troisième partie à partir du logiciel de simulation Witness™. Les résultats de la simulation permettent d'établir pour un modèle donné les valeurs des indicateurs de l'adéquation d'une politique de maintenance pour une politique de production.

1. Gestion de maintenance et de production

Nous rappelons les concepts et les activités de la maintenance pour expliciter leur intégration à ceux de la production.

1.1. Organisation structurelle de la maintenance

La gestion de maintenance passe par l'atteinte négociée de compromis permanents avec le service de production. Ces équilibres contribuent à une meilleure productivité globale du système par une adéquation à court, moyen ou long terme entre impératifs de production et nécessités de maintenance. Ce constat conduit à diviser la mission de maintenance en trois niveaux politique, stratégique, tactique qui définissent une organisation de la fonction maintenance.

Le niveau politique est celui de la définition d'un cadre général d'action. Il est influencé par les choix de l'entreprise, fixant les contraintes économiques de rentabilité et les lignes directrices de sa politique.

Le niveau stratégique est celui des prises de décision sur les modes de fonctionnement du service et des ressources (humaines, matérielles, de gestion) nécessaires à l'atteinte des objectifs. Basés sur des critères économiques et/ou techniques, ces choix portent sur :

- l'assignation des objectifs,

- les formes d'intervention sur les équipements identifiés : action préventive (systématique, conditionnelle, d'amélioration), corrective (palliative, curative), mixte (correctif + préventif) ou sous-traitée,
- les paramètres servant à leur définition complète (intervalle d'inspection, durée de révision, matériels requis,...),
- les moyens (humains et matériels) à affecter,
- les méthodes de gestion associées.

Le niveau tactique est celui où s'applique la stratégie choisie. Trois tâches principales apparaissent à ce niveau :

- l'intégration des travaux conduisant à fusionner, dans un même planning, des interventions préventives échelonnées selon un calendrier établi par le niveau stratégique et des demandes formulées en temps réel par la production pour des interventions curatives,
- la réalisation propre des travaux du planning selon des méthodes déterminées par la stratégie,
- le recueil des données générées par le système et les interventions auxquelles il a été soumis.

Une relation d'ordre existe entre les trois niveaux : la politique détermine la stratégie qui régule la tactique. Les degrés de liberté sont faibles au niveau tactique. Ils permettent simplement l'adaptation à une situation évolutive d'une stratégie définie selon des critères stables.

La stratégie et la politique ne sont remises en cause qu'après une évaluation. Cette évaluation peut être soit périodique (avec un horizon moyen ou long terme), soit déclenchée par un comportement jugé non conforme du système de production.

Dans ce contexte, la simulation peut contribuer à l'évaluation du niveau stratégique et à la définition des actions à conduire au niveau tactique.

1.2. Stratégies de maintenance

La définition d'une stratégie de maintenance dans un atelier manufacturier suit plusieurs étapes de raffinements successifs. Des choix sont faits mettant en jeu un nombre important de paramètres liés aux situations à documenter, aux méthodes à établir et aux structures à mettre en place.

Évolutifs suivant le contexte, les objectifs ou encore la période d'observation sur lesquelles sont établies les stratégies de maintenance, ces paramètres sont dits "variables de maintenance" ([Pér 96], [Noy 96]).

Une partition réalisée suivant les caractéristiques propres des variables et les champs auxquels elles se rapportent permet d'identifier :

- des variables structurelles V_{fs} , liées à la description de la structure du système et de son contexte : moyens de maintenance humains et matériels et, bien sûr, ressources à maintenir,
- des variables organisationnelles V_{fo} , caractérisant le mode de fonctionnement, les relations internes, les modes de comportement et réactions face à des situations variées,
- des variables d'environnement, décrivant les liens existant entre la maintenance et un service connexe. Ces variables V_{fe} , issues d'un milieu voisin, définissent le cadre d'action dans lequel doit évoluer le service maintenance mais ne sont pas initialisées par ce service. Elles interviennent très tôt dans l'ordre de définition des variables nécessaires à la représentation d'une stratégie.

Une deuxième classification de ces mêmes variables peut être réalisée suivant la situation des variables dans la chronologie de définition de la stratégie, i.e. l'instant d'initialisation de la variable (qui distingue aussi les acteurs concernés par cette initialisation).

Établir une stratégie passe par l'initialisation des variables de maintenance. Il est donc important de structurer celles-ci et leur forme d'emploi. Là encore, la simulation peut guider le décideur dans la sélection des variables utiles au bon fonctionnement du système qui doit être maintenu. L'étape de modélisation préliminaire à la simulation et le travail de réflexion qu'elle implique permettent déjà d'apporter des enseignements sur les composantes du service maintenance. Le traitement dynamique de la simulation permet de valider leur forme d'exploitation.

1.3. Situations particulières

D'autres situations renforcent l'intérêt d'emploi de la simulation en support d'évaluation et d'analyse des stratégies de maintenance. Ce sont :

- l'application de la TPM (Total Productive Maintenance), approche d'amélioration de la productivité globale de l'appareil de production par une meilleure implication de tous les personnels de l'entreprise dans la fonction maintenance [Nak 90]. La TPM est articulée autour de plusieurs points visant tous l'augmentation du rendement des installations par une maintenance plus adaptée et plus efficace. Les plus importants sont : 1) l'introduction du concept d'auto-maintenance effectuée par des opérateurs de production, 2) l'optimisation de la maintenance programmée.

La simulation permet à ce niveau une prise en compte des actions au niveau des "gammas" opérateur descriptives des activités ou responsabilités qui leur incombent.

- la logique de décentralisation de la maintenance selon des considérations fonctionnelles ou géographiques. Chaque secteur possède un degré d'autonomie propre avec des objectifs définis et un budget. Une structure peut, selon les cas, fonctionner avec plusieurs équipes de maintenance affectées par secteur et en charge d'une partie de l'installation ou une seule composante centralisée et intervenant sur la globalité des moyens de production. Dans certaines situations, les deux formes d'organisation cohabitent.

La simulation permet une analyse explicite de ces situations.

1.4. Les indicateurs de performance

Les indicateurs de performance en maintenance industrielle sont principalement axés :

- pour les équipements maintenus, sur des mesures de sûreté de fonctionnement [Lis 95] et des appréciations économiques,
- pour les moyens de maintenance, sur des niveaux de disponibilité et de fiabilité spécifiques aux outils, pièces de rechange, opérateurs,... et bien évidemment des critères économiques.

Les indicateurs économiques sont eux directement liés aux coûts de non efficacité des équipements [Bou 88].

Plusieurs formes sont accessibles :

- les coûts directs : coûts des dommages matériels, des stocks de réserve, de la sous-traitance,...
- les ratios relatifs aux coûts de maintenance : coût de maintenance/valeur ajoutée produite, coûts de maintenance/quantité de production,... (norme Afnor X60-020 [Afn 88]),
- les ratios d'efficacité économique : (coûts de maintenance + coûts de non disponibilité)/ C.A. de la production,...

Les tableaux de bord en gestion de maintenance suivent ces tendances :

- niveau de production, rendement global de l'installation ou des équipements clés,
- coûts directs de maintenance, de non efficacité,

- budgets divers.

Nous présentons dans la troisième partie, les indicateurs construits sur cette base appliqués à un exemple particulier.

2- Modélisation pour la simulation

La simulation d'un système industriel a pour but de reproduire sur un modèle certains comportements dynamiques du système afin d'analyser les flux dans le système et la disponibilité des ressources engagées ([Cer 88], [Ban 96]). Le modèle permet de décrire les particularités physiques du système avec certains traits de gestion de production. Il nécessite l'utilisation d'éléments physiques représentatifs des entités tangibles dans la situation réelle étudiée et l'emploi d'éléments logiques caractérisant les aspects conceptuels du modèle.

2.1- Les processus à considérer

D'une manière générale, les processus de base desquels dépend l'évolution des systèmes et auxquels nous nous intéressons sont :

- le processus de *sollicitation/réponse* qui fait évoluer le système entre les situations de repos et de service,
- le processus de *défaillance/réparation* qui fait basculer le système vers un état de défaillance puis revenir vers un état opérationnel consécutivement à une action de maintenance curative (si le système est réparable),
- le processus de *d'inspection/révision* qui conduit vers les états de maintenance préventive depuis un état généralement opérationnel avant retour vers ces états.

Pour traduire pleinement la notion de mission de production et les composantes qu'elle implique, la simulation devra restituer ces trois processus.

A l'exemple des défaillances intervenant sur les équipements, la plupart de ces processus mettent en jeu des phénomènes à caractère stochastique.

C'est le cas des actions de maintenance curative, tributaires de facteurs multiples liés à la qualification des équipes d'intervention, aux conditions opératoires et autres paramètres divers. Il en est de même des actions de maintenance préventive, tant pour la distribution des dates d'intervention que pour les durées effectives de celles-ci. Ce phénomène est particulièrement marqué lorsque l'on est en présence d'une maintenance conditionnelle ou encore lorsque l'on profite d'une intervention curative pour réaliser une révision d'ensemble de la ressource incriminée.

Notons que ce caractère stochastique est à la base des événements utilisés par les logiciels de simulation. Par construction, les logiciels de simulation offrent la possibilité de prise en compte des défaillances même s'ils ne présentent pas de fonctionnalités dédiées à la maintenance.

2.2. Les éléments de modélisation

La plupart des outils de simulation s'appuient pour décrire les spécificités d'une installation sur des bibliothèques d'éléments virtuels ou sur des éléments fictifs à construire en tout point similaires à ceux du terrain. Nous rappelons les principaux :

- *des articles (ou produit, ou pièce,..)* évoluant dans le modèle et matérialisant les flux. Ces articles peuvent être regroupés en lots, être combinés en un seul ou au contraire partagés en

plusieurs. Ils peuvent aussi être transformés en d'autres articles au cours du déroulement de la simulation et de la progression dans le modèle.

- *des stocks* où les articles sont regroupés et accumulés. Les stocks sont des éléments passifs par le fait qu'ils n'attirent ni ne rejettent d'articles. Ils sont caractérisés par une capacité.
- *des ressources (ou moyens,....)* permettant pour les principales la saisie, le traitement et l'affectation d'articles. D'autres ressources secondaires peuvent être requises par les premières pour permettre la réalisation de leur mission.

Les éléments organisationnels complètent la description physique. Leur définition est essentielle pour permettre le traitement et l'exploitation ultérieure du modèle. Ils se superposent à la structure concrète déjà décrite et s'attachent à la logique qui fait progresser le modèle. Ces éléments organisationnels sont :

- *des temps* affectés à chaque phase de la simulation. Il est important de pouvoir prendre en compte les temps "machine" (temps de cycle ou de production, temps de réglage, temps de réparation, de révision), les temps de déplacement entre entités via des éléments transitiques, les temps de chargement et déchargement des véhicules, ...
- *des circuits* descriptifs des chemins parcourus par les articles ou les flux. Ces circuits spécifient les chemins de passage entre les éléments physiques de la représentation. Ils sont liés aux articles qui, selon leurs caractéristiques et leurs besoins, nécessitent de transiter via tel ou tel élément physique.
- *des plannings* représentant les périodes dites "d'ouverture" des éléments pour remplir leur mission. Ces plannings sont des séquences de périodes d'activités et d'inactivités. Ils permettent de simuler les horaires de travail de l'installation et de ses éléments.
- *des lois* d'entrée et de sortie. Elles traduisent la dynamique de cheminement entre les éléments. Un élément actif "tire" en entrée ou "pousse" en sortie l'article qui doit transiter par lui. Un élément passif, attend d'être approvisionné (ou déchargé) par l'élément amont (ou aval) des articles qui lui sont destinés (ou qu'il a traités).
- *des distributions* théoriques ou empiriques, dans le but de traduire les phénomènes pseudo-aléatoires qui gouvernent le système (temps de fonctionnement d'une machine réparée, instants d'occurrence des défaillances, durée de réparation ou de révision,...).
- *des priorités* permettant de régler des conflits entre éléments en compétition pour le même article ou la même unité de ressource. Selon les niveaux de priorités définis, des entités pourront être déviées de leur mission initiale pour satisfaire des contraintes prioritaires.

2.3. Intégration des paramètres de maintenance

Quel que soit le cadre d'application, les outils de simulation sont destinés à l'évaluation du déroulement d'une production. Ces outils ne proposent généralement pas d'élément adapté à la prise en compte de la fonction de maintenance.

Il est cependant possible de contourner cette difficulté en utilisant les paramètres de production pour reproduire la structure de maintenance. Nous présentons ici l'approche que nous avons suivie pour intégrer la maintenance en simulation.

2.3.1. Niveau physique

La modélisation des actions de maintenance nécessite la saisie des moyens de maintenance humains (nombre de personnels), matériels (outillages, pièces de rechange) et bien sûr des ressources à maintenir.

Les effectifs

La prise en compte des personnels dédiés à la maintenance est semblable sur les plans déclaration, description ou représentation à celle d'un personnel de production.

Pour contourner la difficulté de définition des équipes de maintenance, nous proposons de déclarer les opérateurs de maintenance comme des ressources particulières auxquelles les moyens de production font appel pour leur fonctionnement ou leur dysfonctionnement.

Chaque opérateur étant opérationnel sur un planning propre d'ouverture, les équipes se constituent automatiquement.

La notion de sous-traitance peut être mise en évidence à ce niveau. Le sous-traitant, ressource externe, peut être déclaré avec son planning de disponibilité et ses contraintes. Nous verrons plus loin comment modéliser de façon distincte les qualifications des personnels de maintenance.

Les outillages

D'une manière générale, la prise en compte des outillages pose certains problèmes.

Comme les effectifs, les outillages sont des ressources nécessaires à l'opération de maintien. Ils seront donc déclarés comme tels, directement au niveau des machines.

A cause du nombre conséquent des outillages (lié à la complexité des ressources et à la diversité des défaillances) la liste des ressources affectées à chaque machine peut-être longue.

Ces ressources pourraient être regroupées dans une "boîte à outil" globale rendant alors impossible la réparation simultanée de deux entités défaillantes.

Nous proposons une solution intermédiaire visant à réunir les outils par famille ou par fonction, permettant des interventions simultanées sur des machines défaillantes aux mêmes instants mais distinctes sur le mode de réparation.

Enfin, dans la plupart des cas, il semble acceptable de considérer les ressources de réparation infiniment disponibles. Cette hypothèse n'influe pratiquement pas sur la justesse des résultats de simulation, les outillages n'étant que rarement impliqués dans les attentes de réparation.

Les pièces de rechange

Le même problème que pour les outillages se pose ici, la notion de magasin n'étant pas répandue dans les logiciels de simulation. Nous contournerons cette difficulté de la même manière.

D'une manière générale, les pièces de rechange sont, en dehors des "consommables" et pièces assimilées, spécifiques à chaque machine. Elles apparaissent traditionnellement en nombre limité. La standardisation de modules interchangeables tend dans les équipements modernes à réduire encore ce nombre. On pourra donc affecter à chaque machine les pièces de rechange requises pour la réparation.

Les ressources à maintenir

Les ressources considérées sont essentiellement des machines et, dans une moindre proportion, les différents éléments en lien direct avec les articles.

2.3.2. Niveau stratégique

La modélisation des stratégies de maintenance en vue de leur simulation impose une adaptation des fonctionnalités généralement adaptées à la production.

Les actions correctives

La notion de défaillance/réparation est maintenant intégrée dans les outils de simulation récents. La stratégie de maintenance purement corrective est donc naturellement prise en compte par le modèle. Des distributions peuvent même être associées aux événements de base : intervalles entre défaillances répartis selon des lois exponentielles ou de Weibull, durées de réparation distribuées selon une loi d'Erlang ou log-normale,...

La notion de priorité d'intervention en cas de conflit entre ressources de maintenance sollicitées simultanément peut-être gérée de la même façon que pour les opérations de production.

Le préventif

A notre connaissance, peu de logiciels prennent en compte la notion de maintenance préventive. Cette stratégie est pourtant prépondérante dans beaucoup de systèmes sensibles et ne peut donc en aucun cas être exclue du contexte de modélisation.

Une possibilité de représentation est de considérer les temps de maintenance préventive comme des temps de production sur des articles fictifs. Le temps de traitement de l'article représente la durée d'intervention de l'équipe de maintenance. Sur ce même principe, une distinction entre formes de défaillances (électriques, mécaniques, informatiques,...) peut-être faite pour intégrer au modèle les particularités de chaque mode de dysfonctionnement (lois d'arrivée, durée d'immobilisation,...).

Le planning de lancement de l'article virtuel correspond au calendrier d'intervention sur l'équipement maintenu préventivement. La synchronisation entre ce planning et celui de l'équipe de maintenance permet d'affecter les ressources nécessaires à l'accomplissement des actions de prévention. Dans le même temps, la production sur des articles "réels" n'est plus possible.

Certaines formes d'action telle la maintenance conditionnelle (sur signes précurseurs de défaillances) revêtent un caractère aléatoire plus difficile à prendre en compte.

Il est encore à noter que le planning de maintenance est adapté en temps réel par rapport à celui de production. En conséquence, le mainteneur profite d'un changement de série ou de toute autre forme d'interruption pour opérer son intervention préventive. La notion de réglage des logiciels de simulation peut être exploitée pour traduire des temps de maintenance. Le réglage nécessitant une ressource, il est aisé de déclarer comme telle l'opérateur de maintenance chargée de l'intervention.

La TPM

Cette forme d'action de maintenance est très simple à saisir en simulation. L'affectation d'une ressource de production a une activité de maintenance corrective, voire préventive (en utilisant les particularités de modélisation évoquées ci dessus), ne pose pas de difficulté particulière de modélisation. Les ressources concernées sont partagées entre actions de production et de maintenance selon des priorités établies au préalable.

Centralisation, sectorisation

Ces paramètres, spécifiques du service maintenance peuvent être pris en compte de manière indirecte dans la représentation.

Classiquement, la maintenance sectorisée porte sur des matériels de proximité, bien maîtrisés. La forte réactivité qui en résulte peut être traduite en allouant à l'opération de maintien une durée plus courte que celle correspondante d'une équipe centralisée. Par contre, les opérations de prévention peuvent être confiées au service central, mieux outillé, plus qualifié et polyvalent.

2.4. Exploitation de la simulation

L'exploitation du modèle permet d'abord de construire des indicateurs de performance liés à l'utilisation combinée des ressources de maintenance et de production. Des stratégies peuvent être étudiées ensuite pour optimiser certains paramètres influant sur le rendement de l'installation.

Mesures de performance

Le suivi de la simulation graphique permet de vérifier les états de passage de la machine. Pour les périodes de maintien, seules sont observables les phases de réparation globale (sans distinction du mode de défaillance). Les phases de prévention ou de réparation typées (réparation électrique, mécanique, informatique,...) sont confondues avec des temps de production ou de réglage selon le mode de représentation choisi. La disponibilité ou la

mobilisation des ressources de maintenance (opérateurs, outillages, pièces de rechange) peut également être également analysée.

Les comptes-rendus statistiques de la simulation font apparaître certaines particularités intéressantes pour l'évaluation des performances du système maintenu. Dans une approche non exhaustive, on peut considérer :

- le *temps total* de maintenance corrective (temps agrégé ou distinguant les modes de défaillances), de maintenance préventive, d'attente de ressources,
- le *nombre* de défaillances ou d'interventions préventives (respectivement subies ou effectuées par/sur le système ou chacune de ses ressources prises individuellement),
- les *mesures dérivées de la disponibilité* (intégrant ou excluant les périodes de fonctionnement et/ou les temps préventifs),

...

Optimisation

A partir des valeurs recueillies, des formes d'optimisation simples peuvent être mises en place.

Si la variation du modèle entre deux phases de simulation ne concerne qu'un paramètre, il est facile d'établir un point optimum de fonctionnement associé à la valeur maximale/minimale d'un critère prédéterminé.

Ainsi, on peut envisager par exemple l'optimisation :

- de l'intervalle de maintenance préventive permettant d'obtenir une valeur de disponibilité au moins égale à celle obtenue avec une stratégie purement corrective. Il faut pour cela connaître l'effet d'une action de prévention sur la réduction du temps de défaillance,
- de la taille d'un stock de pièces de rechange pour supprimer toute attente de pièce nécessaire dans l'intervention de maintenance. La connaissance de la loi de réapprovisionnement est ici essentielle pour effectuer le dimensionnement,
- de la composition d'une équipe de maintenance (en nombre et/ou en qualification),
- des priorités de réparation entre éléments pour garantir la fluidité sur un poste critique (goulot d'étranglement, matériel à taux d'amortissement élevé).

3- Application

Nous illustrons ces développements sur un exemple simplifié d'un système de production manufacturier. Nous allons exposer comment les stratégies de maintenance préventive et corrective peuvent être mises en œuvre et évaluées.

Nous utilisons le logiciel de simulation Witness™ version 7 [Wit 96]. Notre choix est lié à la diffusion de ce logiciel et à ses capacités à intégrer de nombreux paramètres, en particulier, ceux des processus de défaillance/réparation caractéristiques de systèmes non fiables.

3.1. Description du système

Nous donnons sur la figure 1 une représentation de l'installation, formée de deux centres d'usinage CU1 et CU2, alimentés depuis un stock d'entrée (stock_e) et déchargeant les articles traités sur deux stocks intermédiaires (stock_1 et stock_2). Un chariot commun, aux deux machines, transporte les articles depuis ces stocks vers un tapis convoyeur qui les évacue vers un stock de sortie (stock_s).

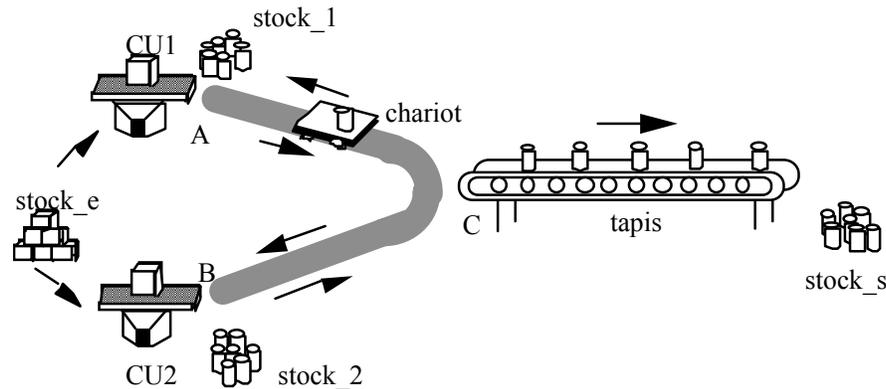


Figure 1 - Schéma de l'installation

- *CU1 et CU2* sont des machines simples traitant un par un les articles tirés de *stock_e* et les poussant en sortie dans *stock_1* et *stock_2* de capacité infinie. Les temps de cycle (traitement de l'article) sont respectivement de 6 ut (unités de temps) et 4 ut. Les deux machines peuvent subir des défaillances pendant leur période de sollicitation. CU2, plus récente et non amortie financièrement, bénéficie d'un niveau de priorité plus élevé.
- *stock_e et stock_s* représentent deux zones de stockage de capacité 100.
- *chariot* effectue une trajectoire cyclique (ACBCA) lui permettant d'évacuer son chargement depuis *stock_1* et *stock_2* vers *tapis*. Il pousse son chargement en C sur le tapis convoyeur. Le chariot est fiable et se déplace à la vitesse de 5 uv (unité de vitesse à vide) et 2,5 uv en charge. Les temps de chargement et déchargement du véhicule correspondent à 1 ut.
- *tapis* est un convoyeur d'une capacité de 5 articles. Il est passif en entrée et pousse les articles en sortie vers *stock_s*. Le convoyeur peut subir des défaillances. Sa réparation est prioritaire par rapport aux deux centres d'usinage.
- *Op1 et Op2* sont des opérateurs de production respectivement affectés aux CU1 et CU2. Leur présence est requise pour le fonctionnement de la machine sur laquelle ils opèrent.
- *Op3* est un opérateur de maintenance, chargé de l'entretien correctif des deux centres et du convoyeur.

Les processus de défaillance des deux centres d'usinage et du convoyeur sont régis par des lois exponentielles négatives. On connaît leur MTBF, respectivement 100 ut pour le CU1, 500 ut pour le CU2 et 20 ut pour le convoyeur. Les temps de réparation sont des lois d'Erlang de MTTR 15 pour les 2 centres d'usinage et 5 pour le convoyeur.

L'ensemble des éléments (matériels et humains) fonctionne sur une semaine de 39 heures.

3.2. Exploitation des résultats

Plusieurs formes d'exploitation sont possibles. Nous nous limitons à deux cas d'emploi de la simulation pour évaluer les stratégies de maintenance corrective et préventive appliquées au système.

Actions correctives

Nous voulons déterminer la répartition des temps machines lorsque la stratégie de maintenance est purement corrective.

Nous supposons que l'article en cours de traitement n'est pas rebuté lors d'une défaillance (cette option est toutefois possible). Le système est engagé dans le traitement d'un lot de 100 articles.

Les résultats sont les suivants :

- temps total de traitement : 3400 ut (temps entre sortie du stock_e et arrivée dans stock_s)
- nombre d'articles traités par le CU1 : 29
- nombre d'articles traités par le CU2 : 71
- nombre maximal d'articles simultanément présents dans stock_1 : 11
- nombre maximal d'articles simultanément présents dans stock_2 : 44
- répartition des temps machines, convoyeur et ressources (figure 2) :

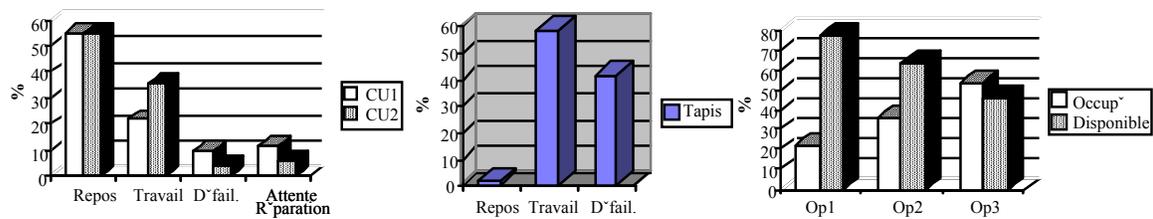


Figure 2

Nous ne commentons pas ces résultats applicatifs d'un cas particulier, l'objectif étant seulement de montrer les possibilités d'exploitation de l'outil de simulation pour évaluer des mesures de performance de maintenance.

Sur le constat d'une grande disponibilité des opérateurs affectés aux machines (Op1 et Op2 sont inactifs pendant les réparations), le responsable de maintenance décide d'appliquer les principes de la TPM. Dans la simulation suivante, l'opérateur Op3 n'est plus affecté à cet atelier et Op1 et Op2 assurent eux-mêmes la réparation des machines. De plus, Op2 est chargé de la remise en route du convoyeur lors des arrêts intempestifs par blocage par des articles.

Les résultats sont les suivants :

- temps total de traitement : 3400 ut (temps entre sortie du stock_e et arrivée dans stock_s)
- nombre d'articles traités par le CU1 : 53
- nombre d'articles traités par le CU2 : 47
- nombre maximal d'articles simultanément présents dans stock_1 : 28
- nombre maximal d'articles simultanément présents dans stock_2 : 23
- répartition des temps machines et ressources (figure 3) :

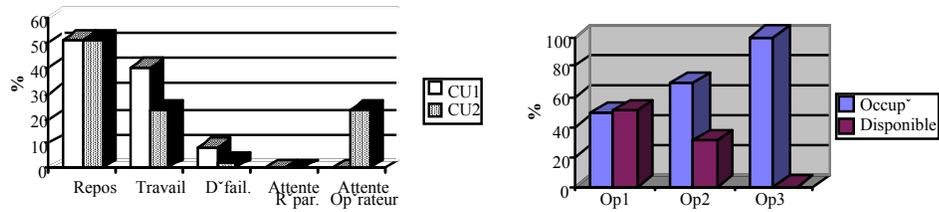


Figure 3

Préventif

La mise en œuvre d'une stratégie de maintenance préventive est moins évidente. Il faut, comme nous l'avons déjà mentionné, procéder à des aménagements de modélisation pour reproduire les phases d'interruption du temps de production pour maintenance préventive.

Les données sont les mêmes que précédemment. Nous utilisons la simulation pour définir la limite d'intérêt d'une maintenance préventive. Pour cela, nous considérons d'abord que la maintenance préventive réduit de 50% le nombre de défaillances (MTBF multiplié par 2, hypothèse simpliste mais fréquemment utilisée).

Les interventions préventives sont effectuées sur le CU1 jugé trop souvent défaillant. Chaque intervention préventive est représentée comme un article "fictif" à traiter et dure 6 ut. Après son passage sur le CU1, l'article est dévié vers un stock annexe et ne participe plus à la simulation.

Nous donnons sur la courbe de la figure 4 la disponibilité (en heures) du CU1 en fonction de l'intervalle d'inspection préventive.

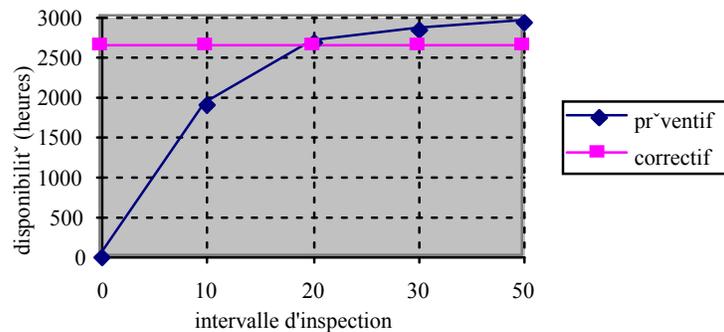


Figure 4

Si la fréquence d'inspection n'excède pas 0,05 (1_{insp}/20h) il est préférable d'opérer de la maintenance préventive. On note évidemment qu'une maintenance préventive avec une fréquence d'inspection excessive (ou d'intervalle d'inspection trop faible) pénalise la disponibilité.

A l'inverse, on aurait pu déterminer pour une fréquence d'inspection donnée les gains attendus sur le MTBF pour rendre l'opération préventive significative (par rapport au cas purement curatif).

3.3. Conclusion

L'application présentée est un exemple simplifié. L'intégration dans ce modèle des politiques de maintenance a été réalisée suivant la logique présentée en deuxième partie. Les indicateurs proposés permettent de prendre des décisions sur les politiques de maintenance en fonction du modèle et de la politique de production.

Les résultats présentés n'ont pas d'autre prétention que d'illustrer la validation et ne peuvent pas être considérés comme généraux.

Toutefois, ce cas d'application permet de valider la faisabilité de la démarche proposée.

Conclusion

L'objectif de notre présentation était de montrer comment pouvaient être abordés les problèmes d'évaluation de stratégies de maintenance à partir des outils de simulation.

L'appréciation des choix faits en conduite de maintenance impose de considérer les différents processus qui interviennent sur les équipements. En particulier, il est fondamental de considérer conjointement les aspects production et maintenance. La simulation, largement adoptée en conduite de production au niveau des évaluations prévisionnelles de comportement, peut également intégrer des paramètres de maintenance pour une évaluation plus complète des performances du système.

Dans ce contexte, nous avons proposé une démarche d'action avec la proposition de certains principes simples de modélisation. Nous avons montré comment les principales caractéristiques d'une mission de maintenance pouvaient être appréhendées dans des modèles de simulation et comment répondre aux interrogations du mainteneur.

Malgré ces résultats, le travail présenté est encore à considérer comme une ébauche dans l'approche de simulation pour l'évaluation de stratégies de maintenance.

Plusieurs actions sont en cours pour mieux formaliser la démarche. D'abord, au plan méthodologique, nous travaillons sur l'uniformisation des principes de modélisation des situations. Nous visons ensuite une expression cohérente et homogène des problèmes pouvant être abordés par des campagnes de simulation.

Nous pourrions alors proposer une aide à la décision basée sur la simulation du système de production maintenu. Une approche complémentaire basée sur les outils d'ordonnancement est également en cours.

Bibliographie

[Afn 88] : AFNOR, "*Recueil des normes françaises X06, X50, X60*", 1988.

[Ban 96] : J. Banks, J.S. Carson and B.L. Nelson, "*Discrete-event system simulation*", Prentice Hall, 1996.

[Bou 88] : F.Boucly, "*Maintenance : les coûts de la non efficacité des équipements*", Afnor Gestion, 1988.

[Cer 88] : A. Cernault, "*La simulation des systèmes de production : méthodes langages et applications*", Ed. Cépadues, 1988.

[Lee 91] : JI. S. Lee, Kyung S. Park, "*Joint determination of production cycle and inspection intervals in a deteriorating production system*", Journal of Operational Research Society, N° 9, pp775-783.

[Lis 95] : Laboratoire d'Ingénierie de la Sûreté de fonctionnement, "*Guide de la Sûreté de Fonctionnement*", Cepadues Editions, 1995.

[Mon 92] F. Monchy, "*La fonction maintenance*", Ed. Masson, 1992.

[Nak 90] : S. Nakajima, "*La maintenance productive totale*", Afnor Gestion, 1990.

[Noy 96] D.Noyes, F.Pérès, "*Objectifs de production et Fonction Maintenance : Modèles d'analyse*", Journal du GAMI "Mécanique-Matériaux-Electricité", décembre 1996.

[Pér 96] F. Pérès, "*Outils d'analyse de performance pour stratégies de maintenance dans les systèmes de production*", Doctorat de l'Université Bordeaux 1, Enit, 1996.

[Wit 96] Witness, *Manuel d'utilisation - Version 7*, Lanner Group Limited, 1996.