HAL
open science

Pronostic et stratégie de maintenance sur l'électronique de puissance

Guillaume Thibaud

To cite this version:

Guillaume Thibaud. Pronostic et stratégie de maintenance sur l'électronique de puissance. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2014. hal-02108232

HAL Id: hal-02108232

https://hal.univ-lorraine.fr/hal-02108232v1

Submitted on 24 Apr 2019

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.

UNIVERSITÉ DE LORRAINE

AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-memoires-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4
Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10
http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php
http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm

Université de Lorraine
Collégium Sciences et Technologies
Faculté des Sciences et Technologies

Master Ingénierie de Systèmes Complexes
Spécialité SSM
Année universitaire 2013-2014

Pronostic et stratégie de maintenance sur l'électronique de puissance

Mémoire présenté par THIBAUD Guillaume
Soutenu le 12 septembre 2014

Stage effectué chez DELIPAPIER
Chaussée du Ban-la-Dame, 54390 Frouard

Tuteur industriel : AUBRY Étienne
Tuteur universitaire : PONSART Jean-Christophe

Remerciements

Je remercie tout d'abord la société Delipapier pour m'avoir permis de réaliser mon stage de fin d'études dans la plus grande usine papetière d'Europe et M. Francis Malgras, directeur de l'usine de transformation, pour la confiance qu'il m'a accordée et la bienveillance dont il a fait preuve.

Je tiens tout particulièrement à remercier mon maître de stage, M. Étienne Aubry, responsable de la maintenance opérationnelle, pour m'avoir fait confiance et encadré tout au long de mon stage dans son service.

Je souhaite également remercier Carlos Marques, Alexandre Rouyer et Pierre Provost pour leur accueil chaleureux au sein de l'équipe maintenance, pour leur disponibilité ainsi que pour l'aide et les conseils qu'ils ont pu m'apporter tout au long de ce stage.

Merci à M. Jean-Christophe Ponsart, maître de conférences et enseignent chercheur au Centre de Recherche en Automatique de Nancy (CRAN) pour son suivi et son aide tout au long de ce stage.

Merci à mon oncle Pascal Thibaud, ingénieur et directeur commercial de Radiall Isle d'Abeau, pour les conseils et les documents techniques qu'il m'a transmis. Merci également à M. Denis Stremplewski, responsable du bureau d'études en électronique chez Megatron, pour son aide précieuse et son expertise durant ce projet.

Je remercie pour finir l'ensemble des personnes de la société Delipapier avec lesquelles j'ai eu l'occasion de travailler et d'échanger et qui ont participé au bon déroulement de mon stage. Merci à Éric Humbert, Jean-Louis Galli et Geoffroy Vincent pour le temps qu'ils m'ont accordé.

Enfin je remercie mes proches pour leurs encouragements et leur soutien sans faille tout au long de ma scolarité.

Tables des matières

REMERCIEMENTS 2

TABLES DES MATIERES 3

INTRODUCTION 4

PARTIE 1 : PRESENTATION DE LA SOCIETE ET DU DEPARTEMENT MAINTENANCE 5

A. DELIPAPIER : UNE ENTREPRISE DU GROUPE SOFIDEL 5

a. Le groupe Sofidel 5

b. Delipapier 5

c. Deux usines en une 5

d. Le procédé de fabrication 7

B. LE DEPARTEMENT MAINTENANCE 8

a. Organigramme et mission 8

b. Des contraintes importantes 9

c. Une stratégie basée sur l'amélioration continue 9

C. DES BESOINS A COURT ET LONG TERME ET UNE PROBLEMATIQUE 11

a. À long terme : vers une maintenance prévisionnelle 11

b. À court terme : résoudre le problème de la maintenance de l'électronique de puissance 11

c. Problématique du stage 11

PARTIE 2 : PRONOSTIC SUR L'ELECTRONIQUE DE PUISSANCE 12

A. GESTION DE PROJET 12

a. Définition de la finalité, de la mission et des objectifs de l'étude 12

b. Les exigences des parties prenantes : 13

C. COMPRENDRE LES CAUSES DE DEFAILLANCE DES CARTES ELAU MC-4 14

a. Formaliser la situation actuelle 14

b. Relais et condensateurs : des composants critiques 15

D. TRAVAUX SUR UN PROGRAMME DE PRONOSTIC 17

a. Qu'est-ce que le pronostic ? 17

b. L'électronique, une approche du pronostic particulière 18

c. La température, principal facteur de vieillissement 20

d. Besoin de capteurs de température autonome 20

D. REALISATION DU PROGRAMME DE PRONOSTIC 21

a. Choix d'un environnement de programmation 21

b. Architecture du programme de pronostic 22

c. Une méthode et des résultats critiquables 26

PARTIE 3 : ÉTUDE THERMODYNAMIQUE 26

A. REMPLACER LES VENTILATEURS, SUFFISANT ? 27

a. Des estimations initiales 27

b. Armoire : Dimensionnement thermique 27

c. Résultats, état final 28

D. NECESSITE DE CLIMATISER LES ARMOIRES ELECTRIQUES 28

a. Un retour à une configuration initiale 28

b. Solution locale contre solution globale de climatisation 29

B. NECESSITE D'ENTRETENIR LES CLIMATISEURS 29

a. Des contraintes environnementales fortes 29

b. Intégrer la maintenance des climatiseurs à la maintenance autonome 30

STRATEGIE DE MAINTENANCE 31

CONCLUSION 32

BIBLIOGRAPHIE .....

ANNEXES .....

Introduction

Avec un chiffre d'affaires de plus de 251 millions d'euros, la société Delipapier, filiale du groupe italien Sofidel, se classe parmi les leaders européens dans le marché du papier tissu sanitaire et hygiénique.
Ancrée dans l'Est de la France, la société emploie 600 personnes et ce sont près de deux millions de rouleaux de papier toilette et sept millions de mouchoirs en papier qui sortent de Delipapier sept jours sur sept, pratiquement 365 jours par an. Représentant désormais 20% du marché du papier sanitaire français avec quelque 120 000 tonnes par an, Delipapier a connu une progression rapide, produisant pour des marques de distributeurs, mais aussi pour ses propres marques, Sopalin et Le trèfle notamment.

Avec un outil de production composé de quatorze lignes de production, l'entreprise dispose d'un département maintenance conséquent qui a fort à faire pour maintenir en état les machines qui le composent. Si jusqu'à présent la stratégie de maintenance était axée sur une maintenance corrective, les responsables du département maintenance ont entrepris une évolution à long terme vers une maintenance prévisionnelle qui a commencé par une étude sur la maintenance de la mécanique des machines de production.
Avant d'entreprendre une étude sur la partie électrique et électronique des machines de production, les responsables du département maintenance souhaitent qu'une étude plus courte soit menée sur un composant critique qui présente un nombre de pannes trop important, signe d'un problème récurrent qu'il faut identifier et solutionner.

Le variateur de puissance, modèle MC-4, est utilisé sur la plupart des lignes de production et sert à contrôler les nombreux axes moteurs. De ce fait on compte plus de 150 cartes MC-4 en fonction dans l'usine et les pannes fréquentes de ce modèle engendrent une baisse de la disponibilité opérationnelle des machines et des coûts de maintenance importants, qui grèvent le budget alloué à la maintenance des équipements électroniques.

Après avoir exposé les enseignements dispensés dans le master ISC lors d'une rencontre avec les responsables maintenance de Delipapier, les concepts de pronostic et de « Prognostics and Health Management » (PHM) les ont interpelé et ils souhaitent qu'une étude soit menée sur le variateur de puissance MC-4 avec une approche système afin qu'une solution à court terme leur soit proposée.

Comment appréhender le vieillissement de l'électronique de puissance pour agir avant l'occurrence d'une défaillance ?

Delipapier attend de cette étude qu'elle lui fournisse les informations nécessaires pour optimiser la disponibilité de ses lignes de production et des économies financières.

Quelle stratégie de maintenance doit être mise en place pour sauvegarder l'électronique de puissance ?

Dans une première partie nous présenterons la société Delipapier et le département maintenance. Les objectifs et les conclusions de l'étude des pannes seront également présentés. La deuxième partie s'attachera à expliquer la méthode d'élaboration d'un pronostic, les solutions retenues et la stratégie de maintenance à mettre en place. La troisième partie développera l'étude thermodynamique et les choix auxquels elle a conduit. Une dernière partie présentera la stratégie de maintenance proposée.

Partie 1 : Présentation de la société et du département maintenance

A. Delipapier : une entreprise du groupe Sofidel

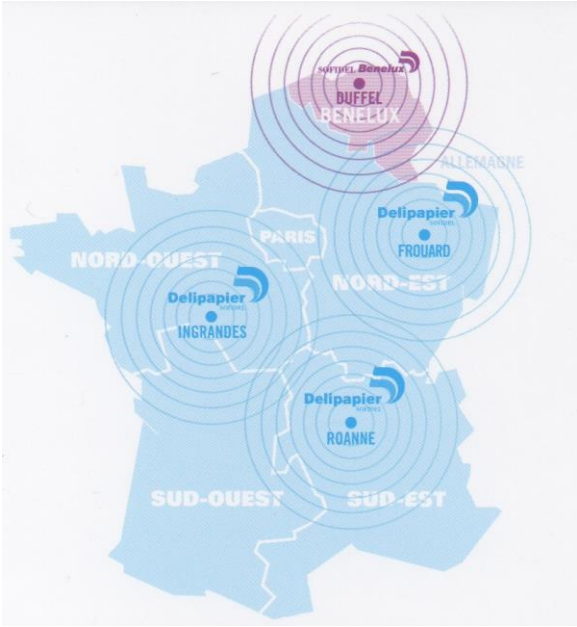
a. Le groupe Sofidel

Delipapier fait partie du groupe SOFIDEL, fondée en 1986 en Italie et dont le siège est à présent à Porcarie (Italie). Le groupe emploie actuellement environ 5000 personnes réparties dans 27 filiales et 13 pays (Italie, Espagne, Suède, Royaume-Uni, Belgique, France, Croatie, Allemagne, Pologne, Roumanie, Grèce, Turquie et Etats-Unis).

Le groupe SOFIDEL est le sixième plus grand fabricant de papier tissu à usage domestique et hygiénique dans le monde et le deuxième en Europe.

b. Delipapier

La société Delipapier a commencé sa construction en 1997 à Frouard, au cœur de la Lorraine et a été inaugurée 7 ans plus tard. Le choix du site d'implantation a été étudié précisément du fait que le transport des marchandises représente une part importante du prix de vente des produits.
Ainsi la Lorraine est située idéalement, en tant que carrefour européen reconnu, avec plus de 70 millions de consommateurs dans un rayon de 400 kilomètres. Le site de Frouard représente un point stratégique pour couvrir le marché Français, Allemand et Benelux.



c. Deux usines en une

Le site de Frouard regroupe deux usines en une :

- **La papèterie** :

La papèterie est équipée de deux machines à papier qui permettent à Delipapier de produire quelque 120 000 tonnes d'ouate de cellulose chaque année, ce qui représente 25% de la consommation française. L'usine fonctionne 24h/24 en 5/8, 365 jours par an et est pilotée par des équipes hautement qualifiées.

Les feuilles de papier sont produites à des vitesses de 2000 m/minute et subissent des contrôles permanents afin de garantir une qualité optimale. Il est à noter que la totalité des produits non conformes est intégralement recyclé.
90% de la production de la papèterie est destiné à l'usine de transformation

Les 10% restants sont vendus à l'usine située à Buxeuil, qui est bien plus petite avec 3 lignes de production.

Pour produire cette ouate de cellulose, le site est équipé d'une station d'épuration physico-chimique et biologique de dernière génération. D'une capacité de traitement équivalente à une ville de 4000 habitants, cette station rejette une eau claire dans la Meurthe, qui est surveillée 24h/24.

- **La transformation** :

L'usine de transformation fabrique trois types de produits : du papier toilette, de l'essuie-tout, des mouchoirs en papier (conditionnés en paquets ou en boîtes), à partir des produits semi-finis que sont les bobines d'ouate. Delipapier possède deux marques propres qui sont Le trèfle et Sopalin mais produit aussi les marques Régina, Softis, Inversoft, nouvelle Soft, Thisrt Pockets, Kittensoft, Yumy.

L'outil de production est composé de 14 lignes de transformation :

- 5 lignes de fabrication de papier-toilette
- 3 lignes de fabrication d'essuie-tout
- 6 lignes de mouchoirs :
    - 5 lignes pour les mouchoirs en paquets
    - 1 ligne pour les mouchoirs en boîte

Vue aérienne des installations de Delipapier (Voir aussi annexe 1 : plan des bâtiments)

d. Le procédé de fabrication

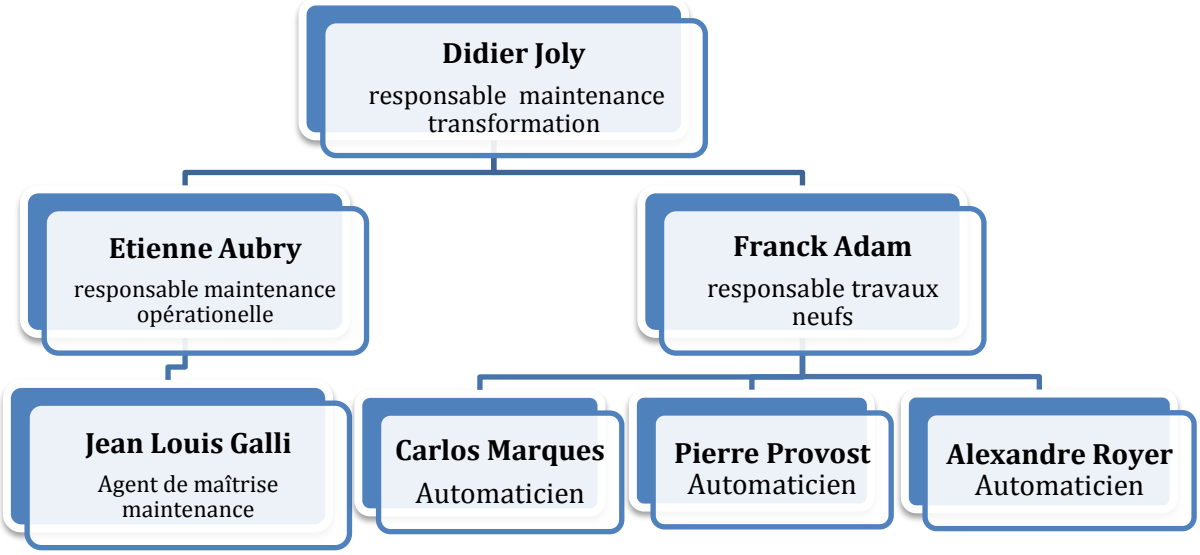
Les bobines d'ouate stockées dans l'entrepôt sont acheminées par les caristes jusque devant chaque bobineuse PERINI des différentes lignes. Les bobineuses peuvent utiliser d'une à trois bobines en simultané et les produits finis peuvent être composés de 2 à 5 voiles.
Les voiles sont dévidés puis gaufrés, peuvent être imprimés (encre et/ou adoucissant) et sont perforés.
Au niveau du groupe de synchronisation, les voiles sont enroulés autour de mandrins en carton (fabriqués en parallèle par une mandrineuse) : la première feuille est collée au mandrin par un trait de colle. Après un nombre défini de feuilles, comptées grâce aux perforations effectuées dans le voile, le papier est découpé et un nouvel enroulement recommence. Le rouleau ainsi obtenu est appelé log ; la dernière feuille du log est également collée : c'est le collage du lembo. Le log, mesurant 2,60 mètres, est ensuite découpé par des scies circulaires afin de former des rouleaux de la taille souhaitée.

Les rouleaux sont acheminés par lots sur deux lignes de convoyeurs jusqu'aux emballeuses où ils sont conditionnés sous film plastique (polyéthylène). Les paquets obtenus sont acheminés vers les sur-emballeuses qui créent des lots, plus pratiques pour la palettisation. Celle-ci sera réalisée par un robot FANUC. La palette de produits finis est amenée jusqu'à la filmeuse par navette automatisée où elle est filmée et étiquetée automatiquement. Un cariste amène ensuite la palette terminée jusqu'à l'entrepôt de stockage.

B. Le département maintenance

a. Organigramme et mission

- **Organigramme du département maintenance**



Durant mon stage, j'étais sous la responsabilité de mon tuteur Étienne Aubry et j'ai travaillé avec l'équipe chargée de la maintenance des équipements électroniques composée de M. Carlos Marques, Pierre Provost et Alexandre Royer.

- **Mission : maintenir la finalité de l'outil de production**

Le département maintenance a comme mission de maintenir en état les moyens de production de l'entreprise. Pour cela, une politique alliant maintenance corrective et préventive est en place, son but est de réduire la durée d'immobilisation des moyens de production par des actions correctives et curatives. Un plan de maintenance préventive est en place depuis peu.

Toute maintenance systématique est exclue de la politique de maintenance, cela a déjà été fait exceptionnellement pour contrer des pannes en série sur une machine, mais l'intérêt d'une telle maintenance chez Delipapier est quasi nul et engendrerait des coûts supplémentaires.

Maintenance corrective
Maintenance exécutée après détection d'une panne et destinée à remettre un bien dans un état dans lequel il peut accomplir une fonction requise (Norme NF EN 13306 (AFNOR, 2001)).

Maintenance préventive
Maintenance exécutée à des intervalles prédéterminés ou selon des critères prescrits et destinée à réduire la probabilité de défaillance ou la dégradation du fonctionnement d'un bien (Norme NF EN 13306 (AFNOR, 2001)).

b. Des contraintes importantes

- **Les contraintes de production**

Les produits fabriqués par Delipapier ne permettent pas de dégager une grosse marge à la vente. En effet cette marge est faible, voire infime sur certains produits ; cela oblige à une production de masse pour l'entreprise afin de rester rentable. Elle a donc la contrainte de faire tourner son outil de production le plus longtemps possible et à des cadences élevées.
Cela impose des contraintes temporelles à l'équipe de maintenance, qui se voit réserver des plages de temps pour intervenir. Le plus souvent, si la ligne de production est en fonctionnement, elle pourra intervenir durant le changement de poste des équipes de production, ce qui laisse entre trente minutes et une heure, avec l'obligation de laisser la machine en état de fonctionnement à la fin de ce temps.
Lorsqu'une machine est en panne, la priorité est de réparer la cause de la panne pour que la machine redémarre le plus rapidement.
Le reste des interventions de maintenance est programmé sur des périodes où les lignes de production ne sont pas sollicitées, et le responsable de la maintenance opérationnelle indique quelles interventions sont à réaliser en priorité.

- **Les contraintes économiques**

Pour fonctionner, le département maintenance dispose chaque année de deux millions d'euros et trois cents mille euros sont dédiés au maintien des équipements électroniques.

c. Une stratégie basée sur l'amélioration continue

Delipapier, dans un processus qualité, est certifié ISO 9001 afin d'assurer une production certifiée et une traçabilité complète descendante et ascendante permettant de garantir à ses clients et aux consommateurs les meilleurs gages de qualité produit.
La qualité nécessitant une parfaite maitrise de l'outil industriel, Delipapier investit en permanence dans la formation de son personnel et dans la modernisation de ses équipements.

- **Amélioration continue de la partie mécanique**

Dans une dynamique d'amélioration continue, une étude d'un an et demi a été réalisée sur la partie mécanique des machines et vient d'être achevée. Cette étude était sous la responsabilité de monsieur Éric Humbert et a été réalisée avec la participation du directeur, des responsables du département maintenance et du responsable de production.
L'objectif premier a été de savoir comment prioriser les différentes lignes de production quant à leur importance pour satisfaire les commandes de leurs clients. Ensemble ils ont réalisé une matrice RIC (Risque client (politique) / Importance ligne / Charge ligne) pour établir un classement des lignes de transformation.
Les indicateurs qui ont servi à en mesurer les bénéfices sont le temps moyen entre deux défaillances (MTBF : Mean Times Between Failures) et le taux de défaillance λ.

La Maintenance autonome

En parallèle, un projet de maintenance préventive a commencé depuis neuf mois et une maintenance autonome a été mise en place en suivant sept étapes :

1. Inspection et nettoyage
2. Suppression des causes de dégradation
3. Etablissement et adoption de standards provisoires
4. Inspection générale
5. Mise en œuvre de la maintenance autonome
6. Gestion autonome
7. Amélioration continue

Une activité assurée par les utilisateurs

La maintenance autonome est une activité assurée par les opérationnels, utilisateurs des équipements. Un bon état de propreté et de fonctionnement doit être assuré par :

- Nettoyage et inspections nécessaires à la détection d'anomalies et de dysfonctionnements
- Entretien courant
- Diagnostic, réparation et/ou facilitation des interventions du service maintenance
- Mesure et suivi des opérations (enregistrements audits, suivi d'indicateurs de taux de panne)
- Optimisation des procédures, modes opératoires et gammes

Principaux bénéfices visés

Les principaux bénéfices visés par le développement de la maintenance autonome sont :

- Répondre avec réactivité en cas de dysfonctionnement
- Développer l'autonomie des équipes de nuit, de week-end
- Impliquer, responsabiliser et motiver les opérateurs
- Libérer les techniciens experts du service maintenance pour des interventions préventives, des interventions à plus grande valeur ajoutée, l'amélioration continue, etc.

Le transfert de tâches simples de la maintenance vers les opérateurs eux-mêmes permet de réserver les tâches d'expertise ou à forte valeur ajoutée aux experts du service maintenance, et par conséquent de redimensionner et redéfinir les missions des agents de maintenance, et le temps gagné (ainsi que les coûts optimisés) a pour but de travailler sur la fiabilité intrinsèque des machines pour une optimisation complète de la disponibilité des machines.

Actuellement, la maintenance autonome est fonctionnelle à 50% ; elle est mise en place sur les machines PERINI. Elle sera bientôt déployée sur les postes d'emballages et suremballages pour être fonctionnelle à 80-90%.

- **Amélioration continue de la partie électrique**

Toute la partie électrique et électronique n'a pas encore été étudiée et avant de lancer une étude, les responsables de Delipapier souhaitent que la situation existante soit formalisée afin

de mettre en lumière les problèmes rencontrés en production. Certains sont connus, mais les causes qui empêchent une résolution définitive de ces problèmes ne sont pas toutes identifiées.

C. Des besoins à court et long terme et une problématique

a. À long terme : vers une maintenance prévisionnelle

Le département maintenance permet la conservation dans un état préalablement défini les outils de production, l'entretien est une condition nécessaire mais insuffisante de la maintenance.
Le département maintenance souhaite que la stratégie de maintenance des équipements électroniques évolue d'une maintenance corrective (dépannage, réparation, remplacement par échange standard) vers une maintenance préventive ou les interventions de maintenance sont effectuées dans l'intention de réduire la probabilité de défaillance d'un bien. Le responsable de la maintenance opérationnelle souhaite que la stratégie de maintenance adopte une attitude proactive en s'orientant vers une maintenance conditionnelle (ou prédictive) afin de bénéficier d'avantages par rapport à la maintenance corrective :

- Moins de défaillances imprévues, donc moins d'arrêts de production,
- Planification des interventions
- Meilleures relations entre Service production et Service maintenance
- Possibilité de mieux gérer le stock de pièces de rechange

b. À court terme : résoudre le problème de la maintenance de l'électronique de puissance

En amont de l'étude qui fera la transition entre ces deux stratégies, mon tuteur souhaite que cette approche proactive de la maintenance soit étudiée pour l'électronique de puissance, plus précisément pour le modèle de variateur MC-4, dont le maintien pèse sur le budget maintenance électronique depuis plusieurs années.

c. Problématique du stage

- **Contexte**

L'électronique de puissance utilisée dans les machines de transformation est soutenue par une maintenance corrective, par échange de composant. Hors le modèle de carte MC-4 de la marque ELAU nécessite de nombreuses interventions de remplacement qui nuisent à la disponibilité opérationnelle des machines et pèse sur le budget de la maintenance.
Il s'agit de proposer une évolution de la stratégie de maintenance mise en place pour la partie électronique de puissance du parc de machines.
Des indicateurs de santé seront définis pour connaître à tout moment la santé des cartes électroniques MC-4. Cet état de santé est accessible par le technicien-automaticien de maintenance. Il pourra selon l'état de santé fourni et la prévision faite par le pronostic choisir la décision de maintenance la plus appropriée.

- **Problématique**

Comment appréhender le vieillissement de l'électronique de puissance pour agir avant l'occurrence d'une défaillance.

Activités à réaliser durant mon stage :
- Formaliser la situation actuelle : Matériel utilisé, matériel en stock, matériel réparé
- Estimer les situations à venir
- Proposer des actions à mener
- Formaliser la stratégie à adopter

Partie 2 : Pronostic sur l'électronique de puissance

A. Gestion de projet

a. Définition de la finalité, de la mission et des objectifs de l'étude

- **FMO : Finalité, Mission, Objectifs**

Finalité :
Réduire les coûts d'exploitation du parc de machines de l'usine de transformation de Delipapier.

Mission :
Etablir une stratégie de maintenance prédictive basée sur le pronostic de l'électronique de puissance.

Objectifs :
- Formaliser la situation actuelle
  - matériel utilisé
  - matériel stocké
  - matériel réparé
- Estimer les situations à venir
  - Réaliser un modèle de pronostic
    - Identifier des indicateurs :
      - De dégradation
    - Créer un état de santé général
- Définir les actions à mener
  - Créer une aide à la décision
  - Proposer une programmation des actions de maintenance
  - Proposer une modification des scénarios d'utilisation
- Formaliser la stratégie à adopter
  - Intégrer le système de pronostic à la stratégie de maintenance
- Diminuer les coûts d'exploitation
- Améliorer la disponibilité opérationnelle

b. Les exigences des parties prenantes :

- **EPP 1** - FournirElementsDecisionMaintenance

Le système fournit des éléments de décision de maintenance prévisionnelle de la carte MC-4

- **EPP 1.1** - FournirEtatDeSanteGeneral

Le système de PHM fournit un état de santé général de la carte MC-4

- **EPP 1.1.1** - FournirEtatDeSanteActuelCarte

Le système fournit un état de santé actuel de la carte MC-4

- **EPP 1.1.2** – FournirEtatDeSanteFuturCarte

Le système fournit un état de santé futur de la carte MC-4

- **EPP 1.2** - DefinirEtatDeSanteMC-4

Des indicateurs définissent l'état de santé de la carte MC-4

- **EPP 1.3** - HistoriserLesDonnees

Les résultats issus du diagnostic et du pronostic sont historisés

- **EPP 1.3.1** – CollecterDonneesResultatDiagnostic

Le système collecte les résultats issus du diagnostic

- **EPP 1.3.2** – CollecterDonneesResultatPronostic

Le système collecte les résultats issus du pronostic

- **EPP 1.4** – AfficherEtatSante

L'interface HM du système affiche un état de santé de la carte MC-4

- **EPP 2** – FormaliserStratégieMaintenance

La stratégie de maintenance est formalisée par des processus

- **EPP 3** – IdentifierContexteNefaste

Le système identifie les conditions propices à la dégradation des cartes MC-4

- **EPP 3.1** – IdentifierCorrelations

Le système identifie les corrélations entre les valeurs des paramètres mesurés et l'occurrence des défaillances

- **EPP 4** – DiminuerCoutsExploitation

La stratégie de maintenance diminue les coûts globaux d'exploitation de la machine

- **EPP 5** – AméliorerDisponibilitéOperationnelle

La stratégie de maintenance augmente la disponibilité opérationnelle de la machine

Dans l'entreprise, aucune personne ne possède d'expérience concernant le pronostic. On m'a donc laissé une grande autonomie qu'il a fallu apprendre à gérer.

Au départ, j'ai orienté mon travail sur deux axes :

- des recherches bibliographiques sur le pronostic
- l'analyse des sorties magasin des composants du rayon électrique/électronique

c. Comprendre les causes de défaillance des cartes ELAU MC-4

a. Formaliser la situation actuelle

Après avoir listé tous les composants électriques et électroniques présents dans le rayon électronique du magasin et vérifié que cela concordait bien avec les stocks enregistrés dans le progiciel SAP qui sert à la gestion des stocks, j'ai analysé les sorties magasin du rayon électronique sur trois ans, de 2010 à 2013.

Références	Total sur 2010-2013 (euros)
VARIATEUR AC3PH-BR 400V 4KW	**-119 930,89**
VARIATEUR AC3PH-AC3PH 380/480V 5,5KW	-4921
VARIATEUR AC3PH-AC3PH 380/480V 11KW	-15663,89
VARIATEUR AC-BR 380/460VAC 4,2KW	-1627,83
VARIATEUR AC-BR 380/460VAC 2,2KW	-8706,6
VARIATEUR AC3PH-AC3PH 380/460V 11KW	-12901,04
VARIATEUR AC-BR 1394AM03 2KW	-1801
VARIATEUR 1394AM04 3KW	-1203
….	….

Extrait du tableau des coûts des changements de composants électroniques de 2010-2013

(Voir annexe 2 : Principe de fonctionnement d'un variateur de puissance)

Sur la période 2010-2013 il y a en moyenne 26,5 pannes ; ce qui donne un temps moyen de fonctionnement avant panne (MTTF) de 13,77 jours pour le parc de cartes MC-4.

Taux de défaillance constant

Lorsque le taux de défaillance est constant, cela signifie que le risque de panne est totalement aléatoire ; on a un système dit « sans effet de mémoire », sans usure, il n'y a pas de cumul de dommage. C'est typiquement le cas des systèmes électroniques.
(Capdevila P., http://fiab-proba.webou.net)

Taux de défaillance	Loi de fiabilité
$\lambda = 1/MTTF$	$R(t) = e^{-\lambda t}$

b. Relais et condensateurs : des composants critiques

- **Les variateurs de puissance ELAU MC-4**

Le variateur de puissance MC-4 (référence AC3PH-BR 400V 4KW), de la marque ELAU (marque de SCHNEIDER Electric), est bien le composant qui pèse le plus sur le budget de la maintenance.
Du fait de l'âge de ces composants électroniques utilisés, il est maintenant très compliqué de trouver des pièces de rechange neuves car elles ne sont plus fabriquées par ELAU. Delipapier est en lien avec l'entreprise Clarion qui est spécialisée dans la maintenance industrielle et qui répare ces composants durs à trouver à l'état neuf.

(Illustrations en annexes 3 et 4)

- **Analyse des devis de réparation**

Tous les devis de réparations sont envoyés avec le matériel réparé, au format papier au responsable magasin et il est fastidieux d'archiver numériquement ces informations. Aussi, celles-ci n'ont pas encore été analysées.
Après un tri des devis pour ne conserver que ceux des réparations des cartes ELAU MC-4, un listing des pannes constatées et des composants changés fait apparaître deux classes de composants défectueux et remplacés à chaque réparation : les relais et les condensateurs.

- **Identifier les composants critiques**

Les relais
L'usure rapide des relais s'explique par la présence de poussières d'ouate en grande quantité qui se dépose sur les contacts des relais et qui sont compactées pendant leur fonctionnement, créant ainsi une pellicule isolante autour des contacts. Pour maîtriser ce problème connu, les armoires électriques utilisées sont étanches.

Les condensateurs
Lors d'une réparation standard, Clarion remplace l'ensemble des condensateurs de la carte. Il y a 4 types de condensateurs utilisés :

- COND 470UF 105 DEG 35V
- COND 2200UF 105 DEG 35V
- COND 47UF 105 DEG 35V
- COND CHIMIQUE 1000UF 105 DEG 35V

Après avoir pris contact avec un commercial de chez Clarion, il apparaît que ce sont les condensateurs chimiques de type aluminium électrolytique qui sont défectueux dans la majeure partie des pannes.
Les condensateurs aluminium électrolytiques sont réputés pour être les composants les plus fragiles de toute la chaine de puissance. La température au sein des condensateurs est le facteur le plus influant sur son vieillissement et donc sur sa durée de vie.

Les condensateurs électrolytiques sont des composants qui permettent de stocker une quantité d'énergie sous forme de charges électrostatiques. Ils sont composés de deux armatures conductrices (anode et cathode) séparés par un matériau diélectrique (oxyde d'alumine).

- **Récupérer l'expérience des techniciens**

Les techniciens automaticiens de maintenance sont les seuls en charge du bon fonctionnement de tout le parc électronique. Ils sont confrontés tous les jours à une multitude de pannes et ont acquis une expérience certaine des systèmes électroniques.
Un dialogue avec les techniciens et l'utilisation d'outils comme le diagramme Ichikawa ont permis de mettre en évidence les causes probables des défaillances des cartes de puissance EMAU MC-4.

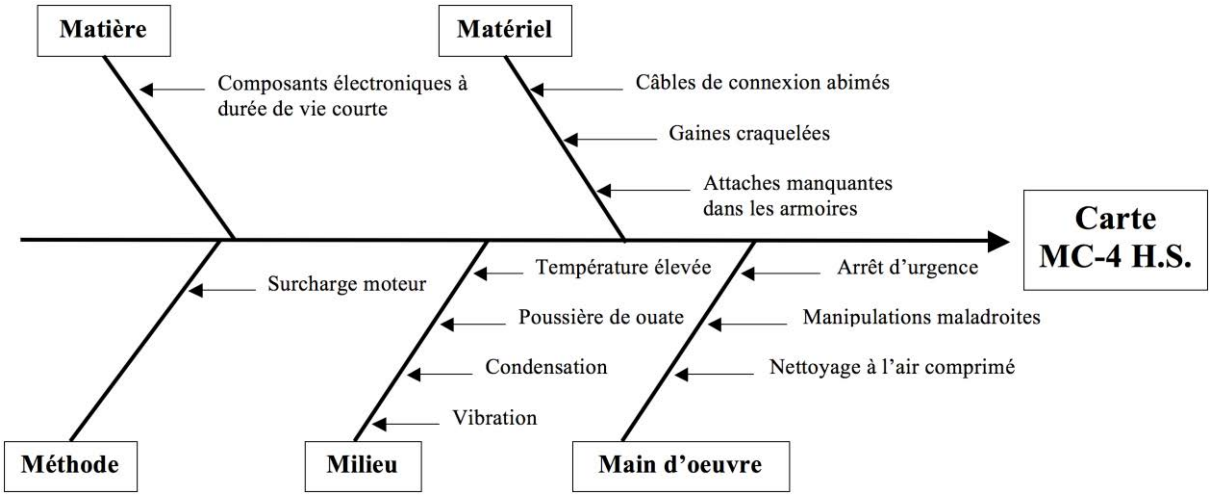
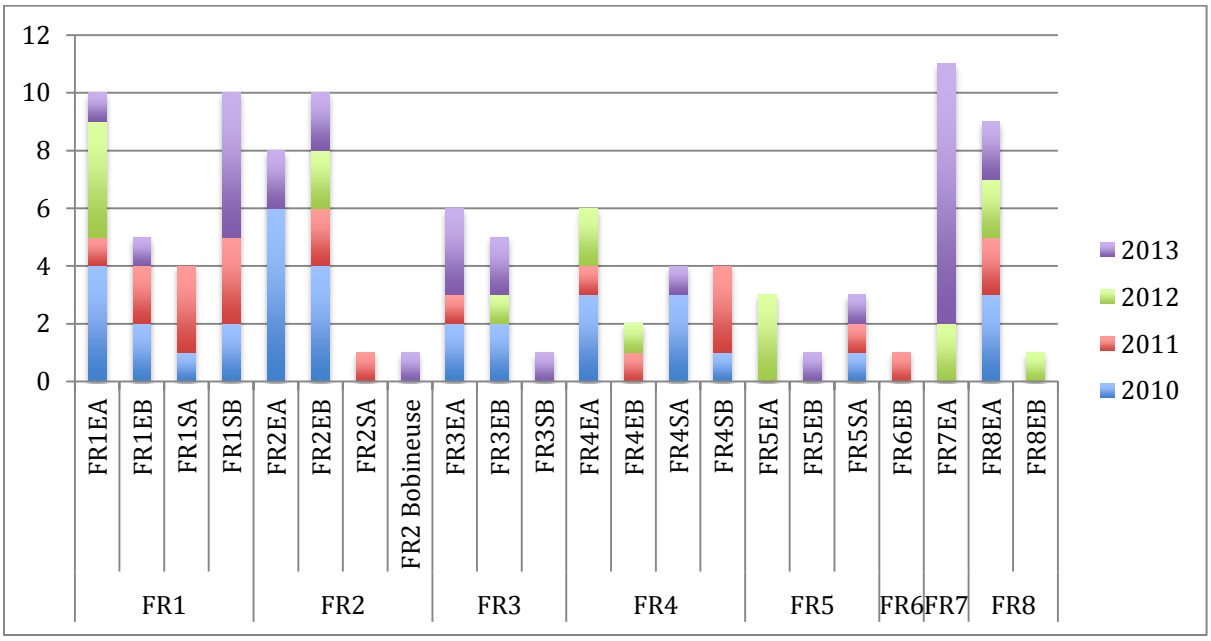


Diagramme Ichikawa

M. Alexandre Rouyer, technicien automaticien, avait entrepris de noter avec précision les détails de chaque panne car on ne retrouvait pas l'origine de certaines sorties magasin de cartes ELAU MC-4. Hors ces composants sont onéreux et le stock de pièces de rechange est faible avec en moyenne 3 cartes ELAU MC-4 en stock pour environ 150 cartes utilisées en production. Cela a permis de retrouver l'origine et la position de la plupart des changements de cartes pendant l'année 2013.



Nombre de pannes de cartes MC-4 par sous-système et par année

d. Travaux sur un programme de pronostic

a. Qu'est-ce que le pronostic ?

Le terme pronostic vient du grec *progignôskein* qui signifie « connaître à l'avance ». Ce processus est associé à la maintenance prévisionnelle et a pour but de prévoir l'état futur d'un système ou d'un composant.
La norme ISO 13381-1, datant de 2004, décrit de façon standard ce que devrait être le processus de pronostic : *« Estimation de la durée de fonctionnement avant défaillance et du risque d'existence ou d'apparition ultérieure d'un ou de plusieurs modes de défaillance. »*
Cette définition précise que le résultat du pronostic doit être formulé sous la forme d'une durée de vie résiduelle (Remaining Useful Life : RUL) et intègre la notion de modes de défaillance courant et potentiel.

Le pronostic est considéré comme le processus qui doit prévoir l'état futur du système et donner l'ensemble des durées de vie résiduelles (du système, de ses sous-systèmes et de ses composants) pour les modes de défaillances détectés et induits, à partir de connaissances sur le système (structure, composition, technologie …) et d'informations passées (historique des modes de fonctionnement passés), présentes (état courant) et futures (scénario de production et de maintenance). (Cocheteux P. et al, 2008)

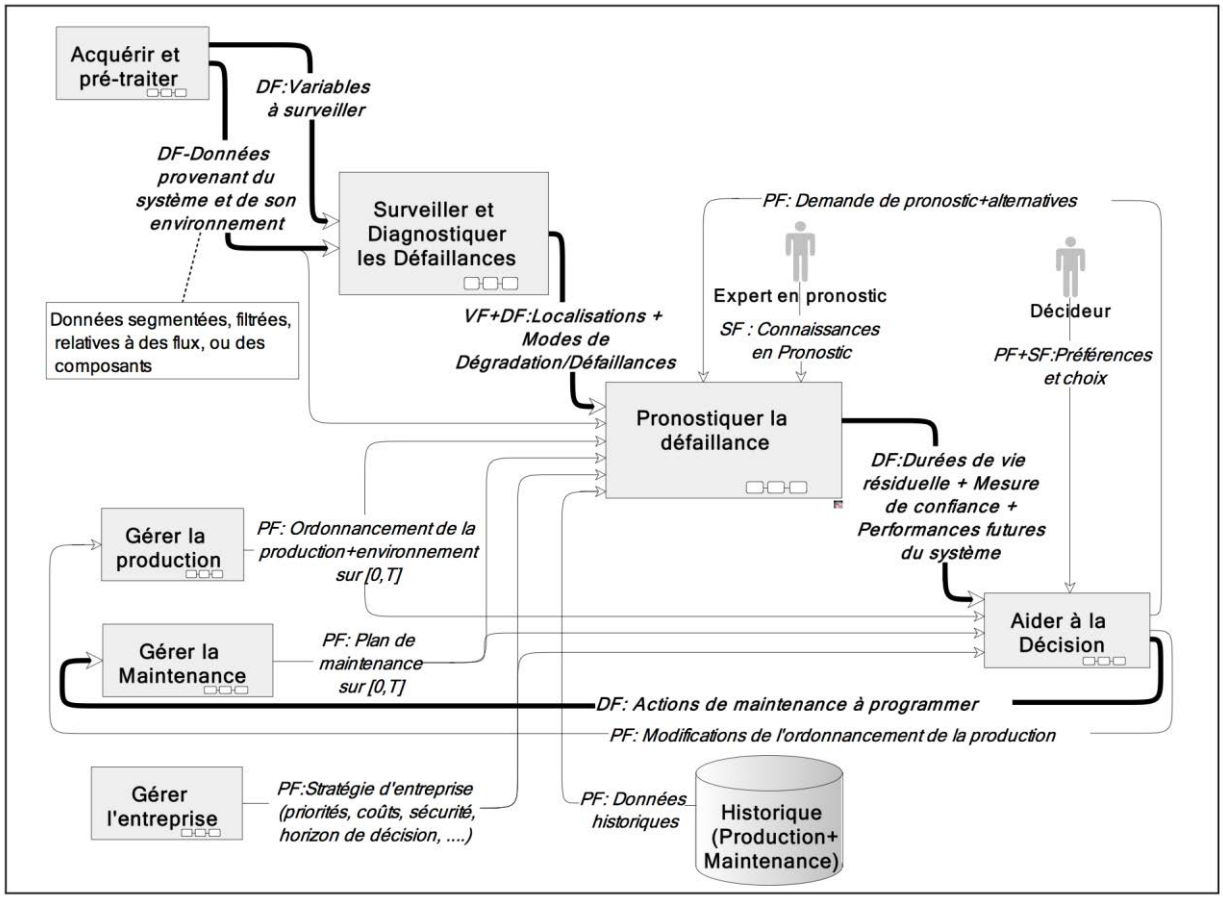


Figure 4 : Environnement du processus « Pronostiquer la défaillance »

Pour mon projet, j'ai utilisé la formalisation du processus de pronostic proposée par l'article *« Formalisation du pronostic à base d'une approche processus »* (2008), elle permet de « garantir l'obtention d'un résultat cohérent respectant un cadre de modélisation reconnu (norme qualité ISO 9000:2000) ».

b. L'électronique, une approche du pronostic particulière

- **Problème du pronostic appliqué à l'électronique**

Si le pronostic est peu développé dans le domaine de l'électronique, c'est parce que lors de la conception, on prend en compte que la durée d'utilisation d'un système électronique sera inférieure à la durée de vie la plus courte des éléments composant ce système. La plupart du temps, les systèmes électroniques sont effectivement utilisés pendant un temps inférieur à leur durée de vie.
Mais dans l'industrie, les outils de production sont exploités pendant plusieurs dizaines d'années et l'obsolescence apparaît bien plus tardivement.

Une pièce électronique est le plus souvent constituée d'un ensemble de sous-systèmes eux-mêmes constitués de composants plus petits. Il suffit que l'un de ces composants élémentaires soit défaillant pour que le système entier subisse une défaillance si aucune redondance n'a été prévue.
La notion de dégradation est également compliquée à appréhender car la durée de dégradation conduisant à la défaillance de la plupart des composants électriques est extrêmement courte. L'idée de suivi de l'état de santé en direct d'un équipement électronique est compromise si la période de dégradation ne laisse pas le temps d'intervenir.

- **Le pronostic appliqué aux condensateurs**

Certains composants électroniques subissent une dégradation progressive qu'il est possible de surveiller, les condensateurs en font partie.

Paramètres à surveiller
Les paramètres qui influencent directement le vieillissement des condensateurs électrolytiques sont :
- La température de fonctionnement
- L'ondulation du courant appliqué aux condensateurs

Influence de la température ambiante sur les paramètres du condensateur

La résistance équivalente série (ESR : Equivalent Series Resistance) varie en fonction de la température ambiante. Elle décroît avec l'augmentation de la température ambiante. La température au sein du condensateur est le facteur le plus influent sur son vieillissement et donc sur sa durée de vie, d'où la nécessité d'un capteur de mesure de température pour pouvoir suivre son évolution.

Influence de l'ondulation du courant sur les paramètres du condensateur

Un condensateur électrolytique est souvent soumis à des tensions alternatives. Il est donc traversé par des ondulations de courant provoquant des pertes Joule du composant d'où son échauffement. La puissance dissipée par le composant est le produit de l'ESR du condensateur avec le courant au carré, courant I correspondant à la valeur efficace de l'ondulation de courant. Comme la résistance ESR dépend de la fréquence, le calcul de la puissance se fait en additionnant les puissances relatives à chacun des harmoniques du courant. Comme l'ESR dépend aussi de la température du composant, elle est calculée soit à une température de référence, soit à la vraie température du condensateur.

Bien que ce soit la température au cœur du condensateur qui détermine réellement la durée de vie du condensateur, la température sur une borne du composant peut constituer une très bonne température de référence pour étudier le vieillissement des condensateurs car elle est facile à mesurer et est proche de la température compte tenu d'une bonne conductivité thermique existant entre cœur et borne.

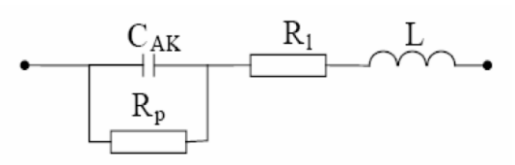


Schéma équivalent des condensateurs électrolytiques

Schéma électrique simplifié

Plusieurs méthodes existent dans la littérature pour la détection des défaillances des condensateurs électrolytiques, la plus proche de l'approche pronostic est celle du « condensateur intelligent », un brevet déposé dans le but de prévoir les pannes des condensateurs en concevant un dispositif de surveillance économique.
Le principe consiste à évaluer l'accroissement de l'ESR pour diagnostiquer le vieillissement, donc la défaillance prochaine en trois étapes :

- Mesurer la résistance ESR en ligne grâce à la mesure de la tension et du courant
- Calculer l'ESR pour un même condensateur neuf grâce à la mesure de la température du boîtier
- Comparer ces deux grandeurs pour évaluer le vieillissement

(Abdennadher M. K, 2010)

En complétant cette méthode avec une projection dans le temps utilisant un processus Gamma, on pourrait établir une RUL fiable pour le condensateur surveillé.

Cependant cette méthode n'est pas réalisable chez Delipapier car il faudrait pouvoir prélever une carte MC-4, l'instrumenter et la remettre en place, or cela engendrerait une coupure dans la production alors même que l'impératif est de produire.
De plus, le système de surveillance est réalisé pour un seul condensateur, le convertisseur de puissance, selon sa puissance de sortie, peut contenir plusieurs condensateurs (le fait d'utiliser un système de surveillance pour chacun des condensateurs est une tâche à la fois couteuse et non pratique pour des systèmes industriels).

c. La température, principal facteur de vieillissement

Les causes générales de vieillissement de l'électronique

Le matériel électronique utilisé dans ces conditions de fonctionnement nominal vieillit normalement, conformément à ce qui a été prévu lors de sa conception. Une usure plus rapide peut apparaître principalement dans ces quatre cas :

- Le matériel est soumis à des températures plus élevées que celles prévues
- Le matériel est soumis à une intensité plus élevée que celle prévue
- Le matériel est soumis à des vibrations
- Le matériel subit des régimes transitoires violents, type arrêt d'urgence

Le choix de mesurer la température

N'ayant pas de connaissances importantes en électronique j'ai pu consulter M. Denis Stremplewski, responsable du bureau d'études en électronique chez Megatron, pour qu'il m'explique les règles de conception en électronique et les calculs de fiabilité. Ses conseils ont été de faire au plus simple car seul l'architecte de la carte MC-4 a une vision globale des choix de conception et de la fiabilité de chaque élément qui la compose.
Il a pu me confirmer l'impact de la température sur l'usure des condensateurs électrolytiques et m'a conseillé de concentrer mon étude sur eux.

d. Besoin de capteurs de température autonome

- **Choix d'un capteur**

Le service maintenance ne disposant pas de capteurs de température, il a fallu s'en procurer. Le data logger de chez Lascars Electronics convenait avec sa compatibilité Windows (2000, XP, Vista, 7), sa plage de températures adaptée à l'étude (-30°C/+80°C) et sa précision de +/- 0,5°C. Il permet de prendre des mesures de la température à intervalles réglables (10s, 30s, 1min, 5min,…) durant des périodes allant d'une journée à un an.

- **Campagne de mesure**

Il y a de multiples sources de températures dans l'usine et les portes d'accès sont le plus souvent ouvertes dans le but de créer une circulation d'air à l'intérieur du bâtiment. La température extérieure a donc une forte influence sur la température intérieure de l'usine. Les mesures de la température :

- Mesure de la température extérieure de l'usine, à l'abri du soleil et du vent
- Mesure de la température intérieure de l'usine au niveau des armoires
- Mesure de la température de l'air au niveau des points chauds des armoires électriques des emballeuses et sur-emballeuses des lignes FR

- **Analyse des relations entre les différents environnements**

Après avoir relevé les températures, j'ai cherché le lien qui existait entre les températures extérieure et intérieure de l'usine, ainsi que le lien qui existait entre la température de l'air intérieure et la température de l'air de l'armoire lorsque les variateurs de puissance sont en charge.
En utilisant Scilab, le premier lien est apparu très vite comme linéaire, une régression linéaire m'a permis de faire le lien entre température intérieure et extérieure.

Rapport entre température intérieure et extérieure:

$$T_{INT} = a * T_{EXT} + b$$

avec $a = 0{,}6798$ et $b = 10{,}1556$

(Voir graphique en annexe 5)

Pour le deuxième lien, il a fallu trier les intervalles de temps où les cartes étaient en charge et ceux où elles étaient en veille. On obtient également par régression linéaire le lien entre température intérieure et de l'armoire lorsque les cartes de puissance sont en charge.

Rapport entre la température intérieure et de la carte ELAU :

$$T_{ELAU} = a * T_{INT} + b$$

avec $a = 0{,}9064$ et $b = 14{,}3016$

(Voir graphique en annexe 6)

- **Des contraintes humaines**

J'avais informé le personnel de maintenance que j'allais poser plusieurs capteurs dans les armoires électriques afin d'effectuer des mesures, ceux-ci m'ont averti qu'il fallait que je cache ces capteurs et malgré les avoir dissimulés ou mis hors d'atteinte j'ai constaté que deux d'entre eux avaient disparu et un avait été déplacé.
En informant le personnel de production sur la fonction des capteurs et l'objectif de l'étude, les capteurs ont pu être récupérés rapidement. Il a donc fallut recommencer les mesures.

D. Réalisation du programme de pronostic

a. Choix d'un environnement de programmation

De nombreux environnements de programmation permettent de créer des logiciels. J'ai eu comme contrainte de travailler sur un environnement compatible Windows et Mac. Je me suis orienté sur Scilab en version 5.5, logiciel libre au langage proche de Matlab, sur lequel j'avais déjà travaillé et qui permet également d'utiliser des fonctions des langages Java et C.

Le but du programme est d'obtenir une RUL pour chaque carte en fonctionnement.

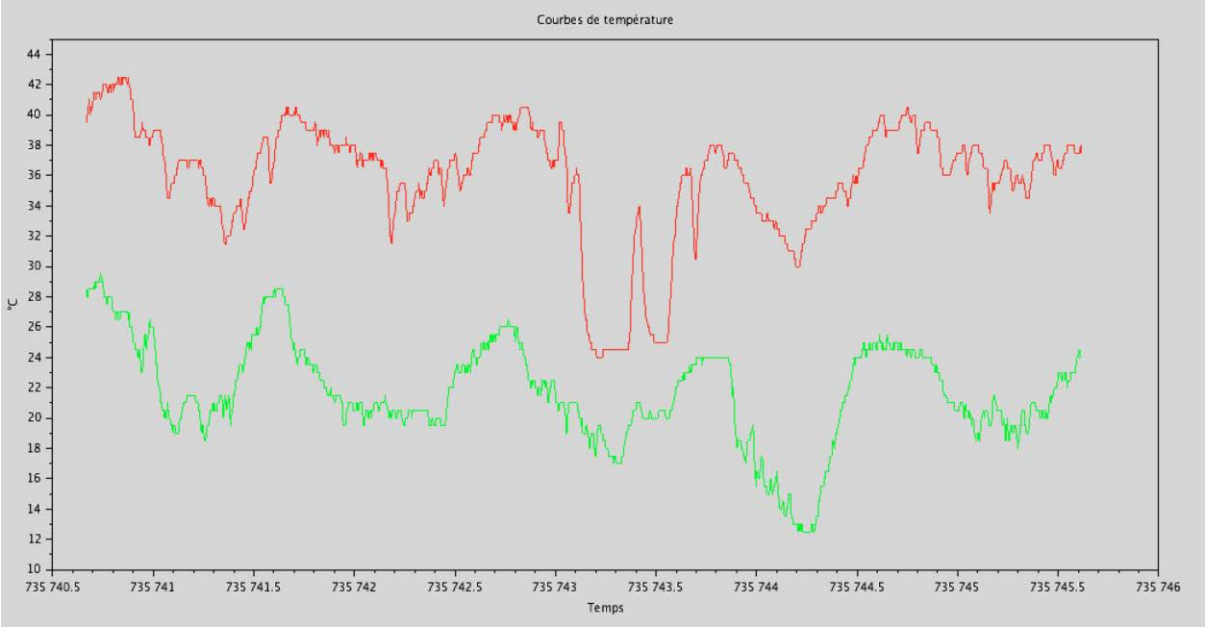
b. Architecture du programme de pronostic

La structure du programme est claquée sur l'environnement du processus « pronostiquer la défaillance ».

1. Acquérir et prétraiter

En utilisant les data loggers, on enregistre la température à intervalles de temps réguliers (5 minutes). On obtient alors une liste au format '.txt' des températures enregistrées.
On importe les données dans le logiciel Scilab, et on convertit les informations temporelles dans un format compréhensible par Scilab (une échelle de temps spécifique à Scilab).

On obtient donc un suivi des températures aux endroits où ont été positionnés les capteurs.



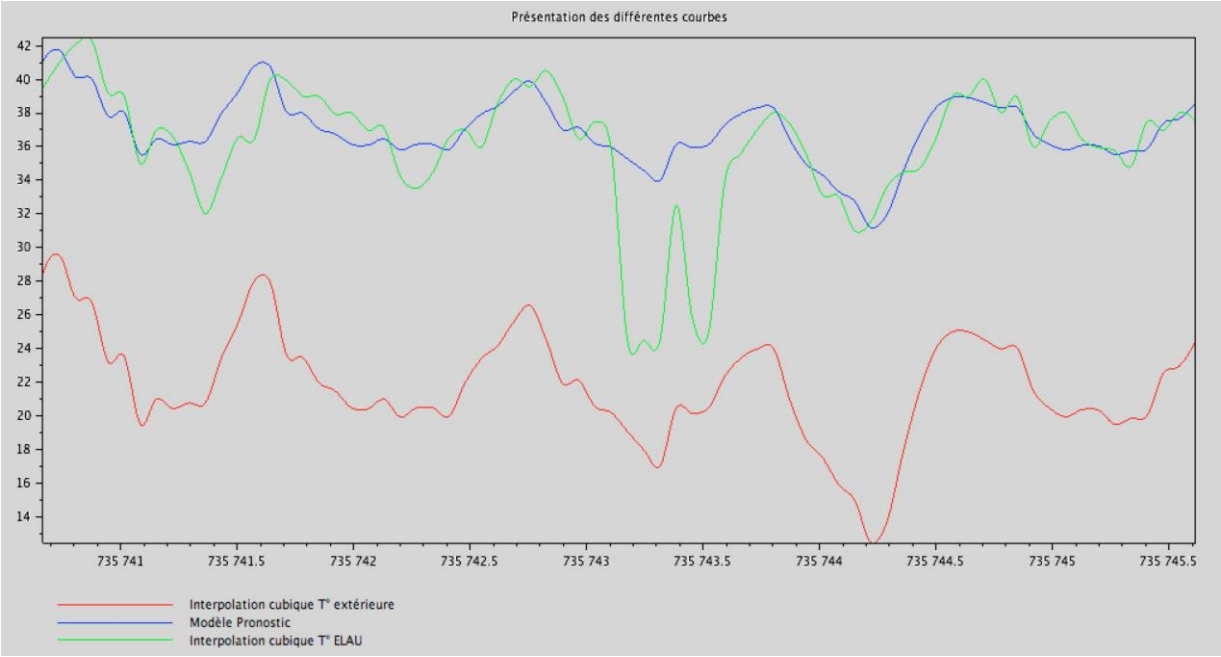
En rouge : Température d'une carte ELAU de FR1EA
En vert : Température extérieure

On observe déjà à l'œil nu une similitude dans les tendances des deux courbes.

Afin de d'améliorer le temps de calcul, on utilise la fonction « smooth » (interpolation cubique, avec un pas de 0,7) sur les différentes courbes afin de réduire le bruit et le nombre de points à traiter.
Puis pour obtenir un meilleur tracé que des segments de droites reliant les différents points calculés, on utilise la fonction « splin » (avec coefficient multiplicateur de 80).

Ensuite, à partir des résultats précédents, on calcule la température de la carte ELAU en fonction de la température extérieure.

Le graphique ci-dessous présente la courbe obtenue par calcul et la courbe tracée à partir des mesures.



On voit que la carte ELAU (courbe verte) oscille entre les modes travail et veille. Avec une variable supplémentaire renseignant sur les départs et arrêts machine, on pourrait affiner le modèle pour qu'il gagne en précision.
Ces résultats ont étaient considérés satisfaisants par mon tuteur de stage et validés. Ils ont permis une compréhension du problème.

2. Surveiller et diagnostiquer les défaillances

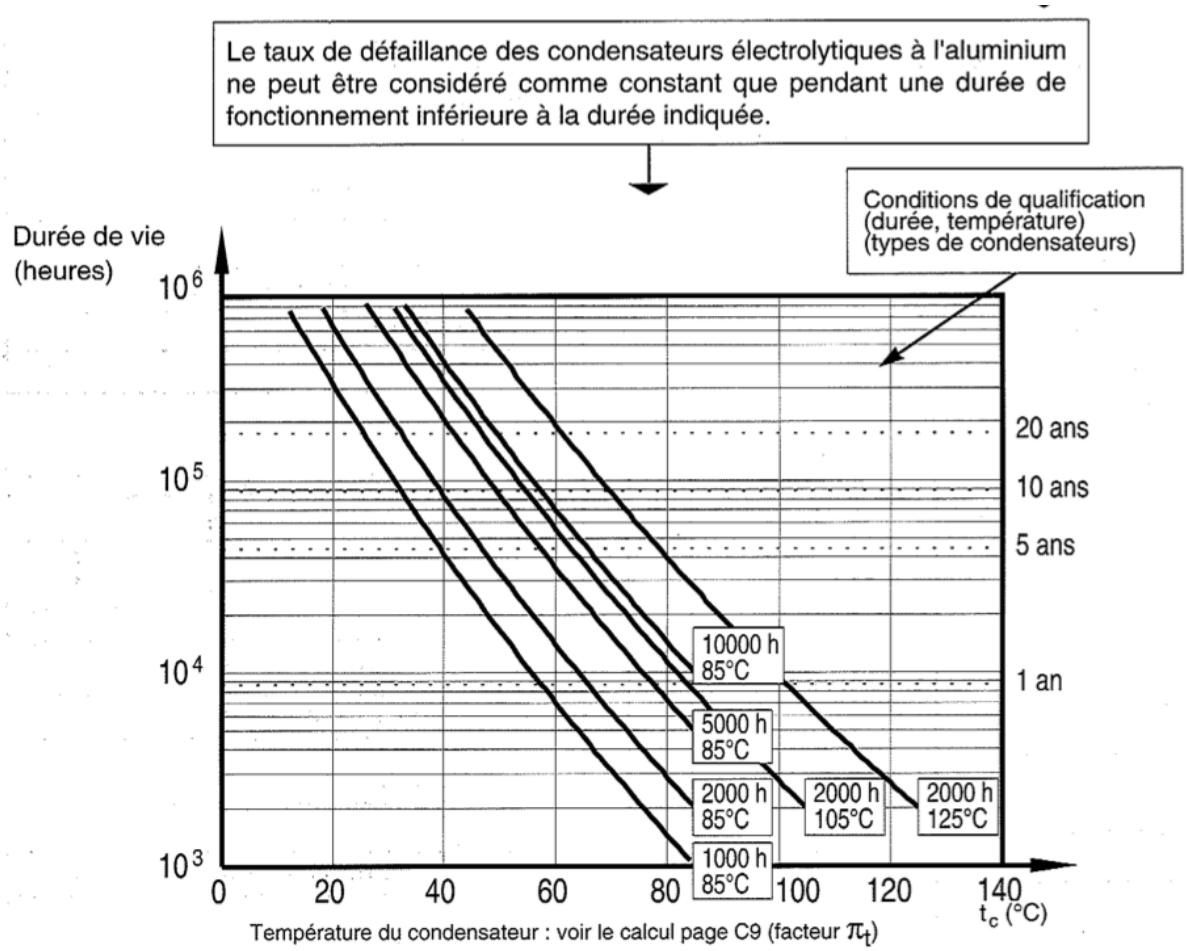
A partir de ces informations et en se basant sur les caractéristiques des composants les plus sensibles implantés dans les cartes, on surveille le vieillissement d'une carte MC-4 'globalement'.
La durée de vie de la carte est égale à celle du composant le plus critique, dans le cas de la carte MC-4 ce sont les condensateurs électrolytiques.

En enregistrant les variations de la température extérieure, on peut estimer les conditions environnementales des cartes MC-4 dans les armoires électriques et ainsi estimer leur état de santé en associant les heures et les températures de fonctionnements. Par intervalle de 1°C, on additionne les temps de fonctionnement à chaque température et comme on connaît la durée de vie des condensateurs à une température donnée d'après le graphique ci-dessous, on peut connaître le niveau de dégradation courant des condensateurs.

Expression mathématique de la durée de vie :

$$Durée\ de\ vie\ (heures)\ =\ a\ *\ e^{\frac{9280}{t+273}}\ *\ 10^{-9}$$

Condition d'essai de qualification	Valeur de a
85°C, 1000 heures	5,5
85°C, 2000 heures	11
85°C, 5000 heures	27,5
105°C, 2000 heures	**43,5**
85°C, 10 000 heures	55
125°C, 2000 heures	150

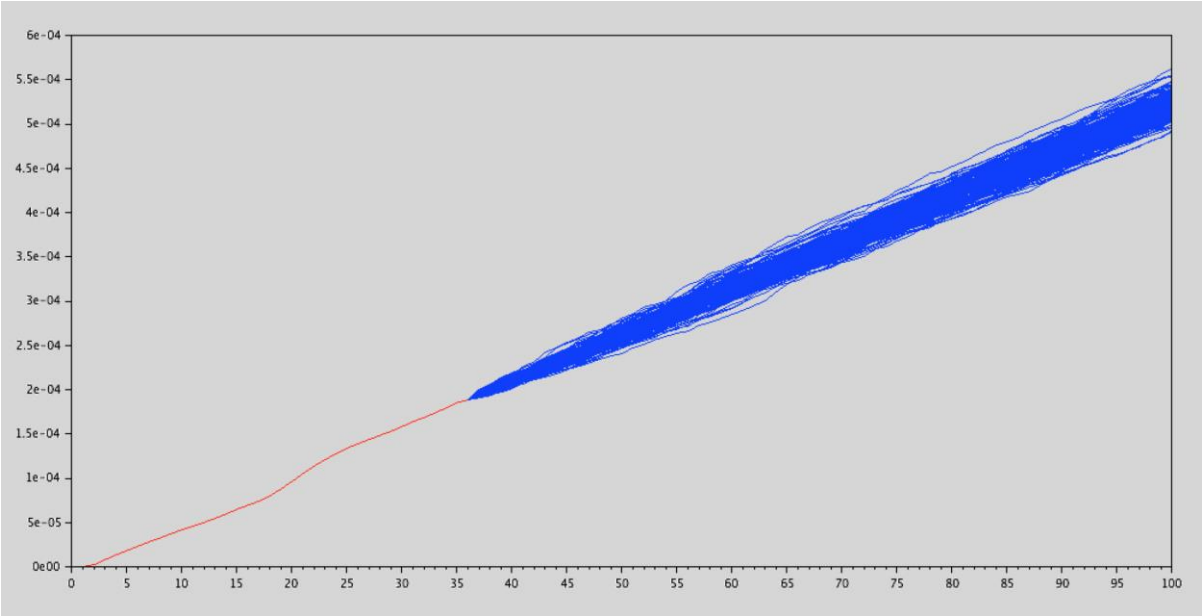


(RDF 93, 1993)

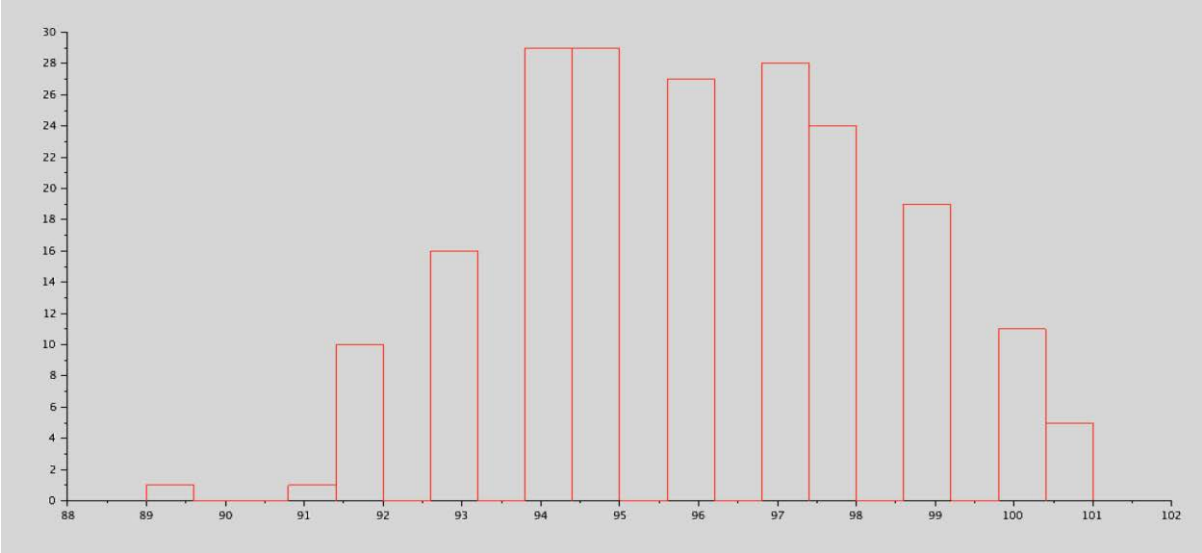
En pronostic, on utilise normalement des indicateurs de santé qui, combinés grâce à un bilan de santé, permettent de créer un index de santé exprimé en pourcentage. Ce pourcentage permet d'indiquer le niveau de dégradation du système et renseigne le processus de pronostic situé en aval.

3. Pronostiquer la défaillance

Pour pronostiquer la défaillance d'une carte, il faut obligatoirement que le processus puisse être renseigné par le processus en amont. On obtient alors un historique de l'évolution de la dégradation de la carte. Dans le but de calculer le RUL, on va projeter l'évolution de la dégradation dans le futur en modifiant à chaque projection les paramètres grâce à des variations aléatoires.
Ci-dessous, on réalise des projections à partir du jour courant de mesure, on définit ensuite le seuil de dégradation souhaité (par défaut le seuil est à 1 et correspond à la date de défaillance).



On trace alors l'histogramme de l'abscisse des projections au croisement avec le seuil.



On peut ensuite déterminer un intervalle de temps à partir de la fiabilité souhaitée (exemple : 90%) dans lequel la carte MC-4 est censée présenter une défaillance.

c. Une méthode et des résultats critiquables

Avant de penser à créer une aide à la décision, il a fallu réfléchir à la confiance que l'on pouvait accorder aux résultats du programme. N'ayant pas l'expérience nécessaire pour avoir un recul suffisant sur mon travail, j'ai consulté le directeur de mon master, M. Éric Levrat, qui a participé à plusieurs articles sur le pronostic que j'ai utilisé durant mon stage. Ses critiques m'ont permis de comprendre la difficulté de réaliser un pronostic juste avec des RUL fiables.
Premier point : dans mon programme, j'utilise une approximation de la température des cartes MC-4 or le modèle que j'ai réalisé à partir de moyenne de température a été réalisé en été ; les conditions thermiques peuvent être toutes autres en hiver. De plus, je ne peux pas réaliser un suivi précis car j'ai pris comme hypothèse que les cartes étaient en état de marche permanent alors qu'elles peuvent être en veille pendant 10% à 20% (environ 144 heures sur 744 heures par mois).
L'intervalle de variation de la température n'étant que de 40°C, un écart de 4°C créerait une erreur de 10%.

Le second point concerne mon choix d'utiliser le processus Gamma pour projeter l'usure d'une carte dans le futur. J'ai décidé d'utiliser ce processus car je pensais modéliser la durée de vie d'une carte MC-4 qui diminuerait proportionnellement à la température de son environnement.
Mais ce processus est utilisé dans le cas d'une dégradation physique qui ne fera qu'évoluer de façon croissante dans le temps, telle une fissure dans une pièce qui ne fera que grandir. Je base l'évolution de l'usure des cartes MC-4 sur la variation thermique de son environnement et le problème vient du fait de cette variation de la température ne peut pas être correctement modélisée par un processus Gamma.

Obtenir une RUL fiable, permettant d'orienter des décisions de maintenance, est très compliqué et demande que les informations en entrée du processus « *pronostiquer la défaillance* » soient les plus précises possible. Mon prototype de pronostic n'est pas utilisable en l'état mais grâce à son développement, on a pu identifier clairement le facteur chaleur dans l'usure prématurée des cartes MC-4.

Partie 3 : Étude thermodynamique

Le pronostic permet dans le meilleur des cas d'anticiper au plus près une défaillance du système pronostiqué mais n'agit pas sur les causes de dégradation. Après avoir identifié la chaleur comme principale cause de dégradation, il fallait trouver une solution rapide pour protéger l'ensemble des variateurs de l'usine alors même que de grosses chaleurs étaient annoncées pour les semaines à venir.
Le critère économique étant prioritaire, mon tuteur m'a demandé d'étudier l'effet de ventilateurs récents pour voir si une ventilation seule suffirait à maitriser la température des armoires, ou plus concrètement, de descendre de 10°C la température moyenne au sein des armoires électriques, ceci afin de diminuer le stress des condensateurs électrolytiques pour augmenter leur durée de vie.

A. Remplacer les ventilateurs, suffisant ?

Les mesures ont montré une température moyenne de 40°C pour les armoires les plus fraîches et jusqu'à 61°C pour les armoires les plus chaudes.

a. Des estimations initiales

D'après Schneider, un variateur de puissance de 4 kW génère environ 180 W de puissance dissipée à charge nominale.
Il y a 14 cartes ELAU dans l'armoire de FR1EA, soit 2520 W. L'estimation de la puissance de la source de chaleur a été augmentée à 3500 W pour tenir compte des autres composants présents dans l'armoire.

Caractéristiques du ventilateur à filtre FF 018 :

Référence	:	01805.0-00	01805.0-01
Débit d'air, soufflage libre	:	550 m^3/h	632 m^3/h
Débit d'air avec filtre de sortie	:	300 m^3/h	345 m^3/h
Puissance	:	64 W	85 W
Profondeur de montage	:	107 mm	107 mm

b. Armoire : Dimensionnement thermique

Calcul pour évaluer ou dimensionner correctement une armoire, en la refroidissant par un ventilateur ou une climatisation

$$T_{air_armoire} = T_{local} + \frac{P_{source} - P_{climatisation}}{V'_{ventilateur} * Cp_{air} + k * A_{armoire}}$$

$$\tau_{air_armoire} = \frac{m_{air} * Cp_{air}}{V'_{ventilateur} * Cp_{air} + k * A_{armoire}}$$

$$Q_{ventilateur} = V'_{air} * \rho_{air} * Cp_{air} * (T_{armoire} - T_{air})$$

<u>Calcul :</u>

Données initiales

Puissance de la source de chaleur	$P_{source} = 3500\ W$
Volume de l'armoire	$V_{armoire} = 12\ m^3$
Surface de l'armoire	$A_{armoire} = 20\ m^2$

Coefficient convection + conduction k
Pour une armoire électrique fermée, en taule $k = 5{,}5\ W/m^2$
(Valeurs typiques de k, d'après le constructeur Rittal)

Température environnante $T_{local} = 22\ °C$
Débit du ventilateur $V'_{ventilateur} = 300\ m^3/h$
Puissance de la climatisation $P_{climatisation} = 0\ W$

c. Résultats, état final

Augmentation de la température dans l'armoire $Dt_{air_armoire} = 18{,}1\ °K$
Température de l'air dans l'armoire $T_{air_armoire} = 40{,}1\ °C$

Pour la réflexion :
Constante de temps (de l'air dans l'armoire) $\tau_{air_armoire} = 62{,}3\ s$
Puissance extraite par le ventilateur $Q_{ventilateur} = 1514\ W$

Par défaut, le calcul a été réalisé en prenant le débit d'air avec filtre, compte tenu du taux élevé de poussière dans l'usine.
On observe que le remplacement des ventilateurs installés par de plus récents ne modifierait pas la température moyenne de l'air à l'intérieur des armoires.

d. Nécessité de climatiser les armoires électriques

Les résultats de l'étude thermodynamique ont été remontés au directeur qui a ainsi pu négocier un budget pour l'achat et la mise en place d'un ensemble de climatiseurs à la place des ventilateurs qui étaient le premier choix de l'entreprise.

a. Un retour à une configuration initiale

Le modèle retenu est le même que celui qui équipait les armoires à l'origine, dans sa version récente. J'ai appris à ce moment-là du stage (4ème mois) que les armoires avaient été livrées avec des climatiseurs il y a environ 10 ans. Le manque d'entretien de ces derniers dans les deux premières années a conduit à leurs pannes et à leurs retraits. Des ventilateurs les ont remplacé mettant en difficulté la pérennité des cartes de puissance sans que la maintenance n'en ait conscience.

Les attentes réelles du sujet de l'étude proposée par l'entreprise ne concernaient pas uniquement le concept de pronostic à appliquer aux cartes MC-4 mais l'identification des causes principales de défaillances qui conduisaient à l'usure prématurée des cartes. À partir de cette idée, j'ai compris que le sujet initial de mon étude et le besoin de l'entreprise divergeaient dans la forme mais suivaient la même direction dans le fond : minimiser les coûts de maintenance en exploitant les cartes de puissance au maximum. Le pronostic leur

importait moins que la compréhension du problème d'usure dans le cadre de leur stratégie industrielle.

Le modèle de Rittal est un régulateur RAL 7035, référence 3302.310, avec une puissance frigorifique de 300 W, il a été installé sur les armoires électriques de telle sorte que le flux d'air frais soit dirigé sur le premier étage des cartes MC-4.

L'achat de 60 climatiseurs a nécessité un investissement de 80 000 euros et dans le même temps, un contrat de 30 000 euros a été passé avec Rittal pour un entretien trois fois par an du parc de climatiseurs nouvellement acquis.

b. Solution locale contre solution globale de climatisation

Le choix d'installer un climatiseur pour chaque armoire électrique permet de retrouver le système dans sa conception initiale mais nécessite un entretien chronophage et couteux. Pour la prochaine étude qui va être menée sur les restes des armoires électriques (de volume beaucoup plus conséquent), une solution locale ne sera pas à renouveler et il faudra étudier l'efficience et l'intérêt économique d'une solution globale intégrant une colonne de refroidissement centralisée avec un circuit de gaines de distribution.

b. Nécessité d'entretenir les climatiseurs

a. Des contraintes environnementales fortes

RITTAL, le constructeur des climatiseurs, recommande un nettoyage des filtres et du radiateur toutes les 2000 heures de fonctionnement lorsque les climatiseurs sont utilisés dans une atmosphère dite « normale ». Hors l'air présent à l'intérieur de l'usine, bien qu'aspiré et filtré, est très chargé en poussière d'ouate.
Des observations ont montré que 24 heures de fonctionnement d'un climatiseur encrassait le filtre de manière conséquente, faisant augmenter la température de l'air des armoires électriques de 28°C à 33°C. Après 48 heures, la température interne de l'air était montée à 36°C et le filtre du climatiseur était visiblement très encrassé. Or un fonctionnement des climatiseurs avec un flux d'air insuffisant entraine un vieillissement prématuré du moteur des climatiseurs, dû au débit de poids de gaz trop faible pour assurer un refroidissement correct du moteur.
À long terme, cela entraine une carbonisation du moteur de compresseur hermétique et suivant le degré de carbonisation les produits suivants peuvent être libérés :

- Humidité

  L'humidité constitue un produit normal de décomposition. Elle est produite par toute combustion et évacuée avec les fumées dans le cas d'appareil de chauffage. Dans un circuit frigorifique, il est indispensable de l'éliminer, car sa présence peut provoquer la formation de boue dans l'huile et le cuivrage.

- Acide

  La carbonisation produit à la fois de l'acide chlorhydrique et de l'acide fluorhydrique qui sont tous deux corrosifs. Ceci est vrai en particulier pour l'acide fluorhydrique, seul acide

qui attaque le verre. La présence d'acides dans un circuit provoque la corrosion des parties métalliques et l'attaque de l'isolant des enroulements. Il est donc indispensable, pour éviter les avaries répétées, d'évacuer les acides.

- Suie

La suie est constituée par la carbonisation de l'isolant et de l'huile. Elle n'adhère que peu aux parois et sa présence se limite généralement au compresseur, à moins que la carbonisation ait été lente et que le compresseur ait continué à tourner.

- Vernis et calamine

Le vernis et la calamine sont les plus difficiles à éliminer parmi les produits de la carbonisation. Leur présence est généralement limitée au compresseur, car ils sont produits à haute température. Comme au moment de la carbonisation, c'est le compresseur qui dans le circuit présente la plus haute température, c'est là que la presque totalité du vernis et de la calamine se dépose.

L'humidité est un des produits de décomposition les plus faciles à évacuer, comme la suie qu'il est facile de détacher des parois et de séparer par filtration. Pour éviter les avaries répétées, il est indispensable d'évacuer l'acide.
Il est donc important de faire entretenir les climatiseurs par une entreprise qualifiée selon les recommandations constructeur, ce qui a été mis en place en même temps que l'achat des climatiseurs. Mais afin de limiter des dégradations prématurées, il faut veiller à nettoyer régulièrement les filtres des climatiseurs. Cela oblige chez Delipapier à un entretien quotidien des filtres de chaque climatiseur.

b. Intégrer la maintenance des climatiseurs à la maintenance autonome

Conscient du niveau d'encrassement des filtres, le responsable maintenance a assigné la maintenance des climatiseurs à un technicien de maintenance, mais c'est une intervention de maintenance de niveau 2, simple et répétitive qui peut être intégrée à la maintenance autonome.
Elle nécessite des équipements de soutien (air comprimé) d'utilisation simple, accessible partout dans l'usine et ne demande aucun outillage. Il faudra cependant mettre en garde les opérateurs de production pour ne pas endommager les éléments fragiles comme le radiateur dont les ailettes sont très souples et plient facilement, obstruant le flux d'air.
Ce type d'actions de maintenance doit être effectué par un personnel qualifié* et nécessite la rédaction de procédures détaillées et des équipements de soutien définis dans les instructions de maintenance.

* Un personnel est qualifié lorsqu'il a reçu une formation lui permettant de travailler en sécurité sur un bien présentant certains risques potentiels, et est reconnu apte pour l'exécution des travaux qui lui sont confiés, compte tenu de ses connaissances et de ses aptitudes.

Stratégie de maintenance

La stratégie de maintenance à proposer doit tenir compte des contraintes du département maintenance ; ainsi une migration du matériel électronique utilisé vers un autre fabriquant n'est pas autorisée par le groupe Sofidel, tout comme la mise en place d'actions de maintenance systématique.

Il faut alors orienter la stratégie de maintenance vers une maintenance préventive, mais l'élaboration d'un plan de maintenance préventive nécessite de connaître au moins des tendances comme la durée de vie moyenne des cartes de puissance MC-4.

De là naît un besoin d'informations complémentaires à celles déjà enregistrées afin d'historiser l'évolution du parc de variateurs de puissance en place.
Pour débuter cet historique, j'ai consigné les numéros de série de toutes les cartes MC-4 présentes dans l'usine, celles en fonctionnement et celles en stock, en leur associant leur localisation dans le but de créer une liste exhaustive et un suivi individuel de chaque carte pour pouvoir retracer l'évolution du parc de cartes MC-4.

- Une intégration de cet historique aux systèmes de GMAO ou de gestion des stocks (SAP) n'était pas possible durant la période de mon stage car elle aurait monopolisé trop de temps alors que de nombreux salariés prenaient leurs congés annuels. L'historique a donc été réalisé sous Excel et mis à la disposition des techniciens automaticiens pour commencer le suivi des cartes MC-4.

L'objectif à long terme est de connaître la durée de vie de ces cartes électroniques et les réparations successives effectuées sur chacune, connaître les pannes les plus fréquentes afin d'en déterminer les causes. La connaissance des grandes tendances devra permettre de mettre un plan de maintenance préventive en place pour optimiser la disponibilité générale des lignes de production et maîtriser les coûts de maintenance de ces composants sensibles.

- Une augmentation du stock de cartes de puissance de rechange est conseillée. Lors de mon premier inventaire, le magasin disposait de quatre cartes MC-4 de rechange, or il a été constaté dans l'historique des sorties magasin que durant les jours de fortes chaleurs, jusqu'à trois ou quatre cartes ont pu tomber en panne en 24 heures.
Un remplacement des cartes les plus anciennes va permettre d'économiser des réparations couteuses qui ne garantissent qu'une durée de fonctionnement limitée.

Un lot de dix cartes de puissance MC-4 neuves a déjà pu être trouvé et acheté.

- La maintenance des climatiseurs doit être déléguée aux opérateurs de production par l'ajout d'une procédure détaillé à la maintenance autonome déjà en place. Les opérateurs doivent aussi recevoir une formation simple mais nécessaire sur l'entretien des filtres et des radiateurs des climatiseurs, afin de préserver leurs intégrités physiques, ceux-ci présentant des fragilités de construction.

Conclusion

Depuis maintenant un an et demi, une étude portant sur l'amélioration continue de la partie mécanique des équipements de l'usine a été réalisée et a permis la mise en place d'un plan de maintenance prévisionnelle et d'une maintenance autonome. Ce mouvement de fond traduit une volonté de changer la maintenance corrective traditionnellement en place chez Delipapier vers une maintenance prévisionnelle conditionnelle.

Avant d'entreprendre la suite de cette évolution pour prendre en compte les équipements électroniques, les responsables maintenances ont souhaités que les problèmes récurrents de fiabilité d'une carte électronique de puissance soient étudiés avec une approche pronostic pour mettre en lumière les causes de ces pannes répétées.

Le prototype de pronostic que j'ai développé n'a pas pu être intégré au système de maintenance parce que incomplet et pas assez fiabilisé, mais il a permis de comprendre l'origine du problème et de réaliser des modifications matérielles et le développement d'une stratégie de maintenance qui a pour but le retour à une situation normale.

Pour une optimisation des ressources financières et temporelles de la maintenance, il faut que les responsables poursuivent leurs travaux et continuent à améliorer leur maîtrise des outils de production en modifiant les informations à enregistrer pour rendre compte de l'évolution de l'état de santé des équipements afin d'agir au plus tard pour éviter des défaillances tout en utilisant ces équipements de façon optimum.

Ce stage de fin d'études chez Delipapier a été pour moi une excellente expérience et m'a permis de découvrir le monde de l'industrie et un secteur d'activité qui m'était inconnu.
Ce stage m'a permis de mettre en pratique les connaissances et les méthodes de travail que j'ai appris durant les années passées à l'Université de Lorraine au sein du master ISC.
J'ai dû apprendre à être autonome et à m'autoformer afin de répondre aux attentes de l'entreprise et de mon tuteur. J'ai appris à mener plusieurs activités simultanément et à prendre des initiatives pour m'adresser aux personnes possédant les compétences techniques qu'il me manquait.

Pour la suite, il reste à voir si les travaux effectués durant ce stage permettront de préserver le parc des cartes de puissance afin que le budget réservé à la maintenance électronique ne soit plus grevé par le seul modèle MC-4.

Bibliographie

- Cocheteux P., Voisin A., Levrat E., Iung B., *« Formalisation du pronostic à base d'une approche processus »*, 19 pages, 2008

- Gucik-Derigny D., *« Contribution au pronostic des systèmes à base de modèles : théorie et application »*, 180 pages, 2011

- Abdennadher M. K., *« Étude de élaboration d'un système de maintenance prédictive pour les condensateurs et les batteries utilisés dans les alimentations sans interruptions (ASI) »*, 190 pages, 2010

- Scilab entreprises, *« Scilab pour les vrais débutants »,* 33 pages, 2013

- Pinçon B., *« Une introduction à Scilab »,* 113 pages, 2010

- Delrot, P., *« Notes sur le guide FIDES »,* 10 pages, 2007

- RDF 93, *« Recueil de données de fiabilité des composants électroniques »,* 79 pages, 1993

- FIDES, édition A *« Guide FIDES 2009 : Méthodologie de fiabilité pour les systèmes électroniques »*, 2010

- Capdevila P., *« Fiab & Proba : site dédié aux calculs de fiabilité prévisionnelle des équipements électroniques »* [en ligne], http://fiab-proba.webou.net/pages/q00.html

Annexes

Annexe 1 : Plan des bâtiments de Delipapier

Annexe 2 : Principe de fonctionnement d'un variateur de puissance

Le variateur de puissance

Le moteur asynchrone est un moteur électrique robuste, facile à mettre en œuvre et qui ne nécessite pratiquement aucun entretien. Il représente environ 80 % du parc de machines électriques.
En raison de son principe de fonctionnement, ce moteur est resté longtemps un moteur à vitesse unique. Certaines applications industrielles nécessitant la variation de vitesse et les asservissements mécaniques lui ont été par conséquent refusés. C'était vrai jusqu'à l'apparition des convertisseurs statiques de puissance.

Principe de fonctionnement

Le réglage de la vitesse des machines asynchrones triphasées est le plus souvent obtenu par variation de la fréquence des courants d'alimentation :

$$n_S = f/p$$

Avec :
n_S : la vitesse de synchronisme du moteur en tr/s
f : la fréquence des courants statoriques en Hz
p : le nombre de paires de pôles magnétiques du moteur

Constituants
Un variateur de vitesse est composé de 3 parties :

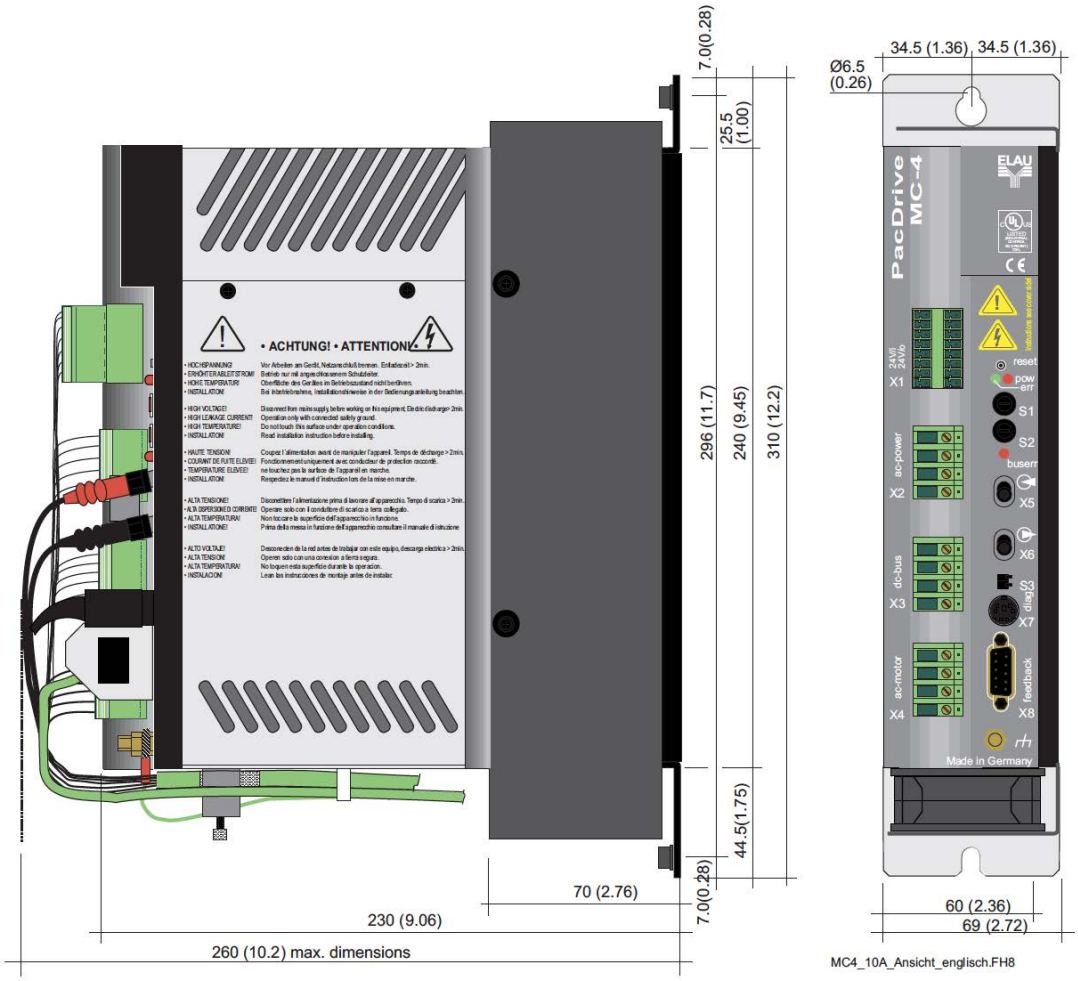
- Le redresseur, le réseau électrique peut être monophasé ou triphasé
- Le filtre, il est constitué essentiellement de condensateurs. On peut ajouter en parallèle une résistance de freinage pour protéger le pont redresseur et le filtre.
- L'onduleur, la commande de l'onduleur, est réalisé en modulation de largeur d'impulsions sinusoïdales

Cette technique consiste à découper la tension d'alimentation afin d'obtenir un courant d'alimentation du moteur quasi sinusoïdal quelle que soit la fréquence d'alimentation. La loi de commande des variateurs de vitesse peut s'adapter à la charge à entraîner et permettre d'obtenir un couple régulier, une rotation régulière à basse vitesse et une limitation des pertes.

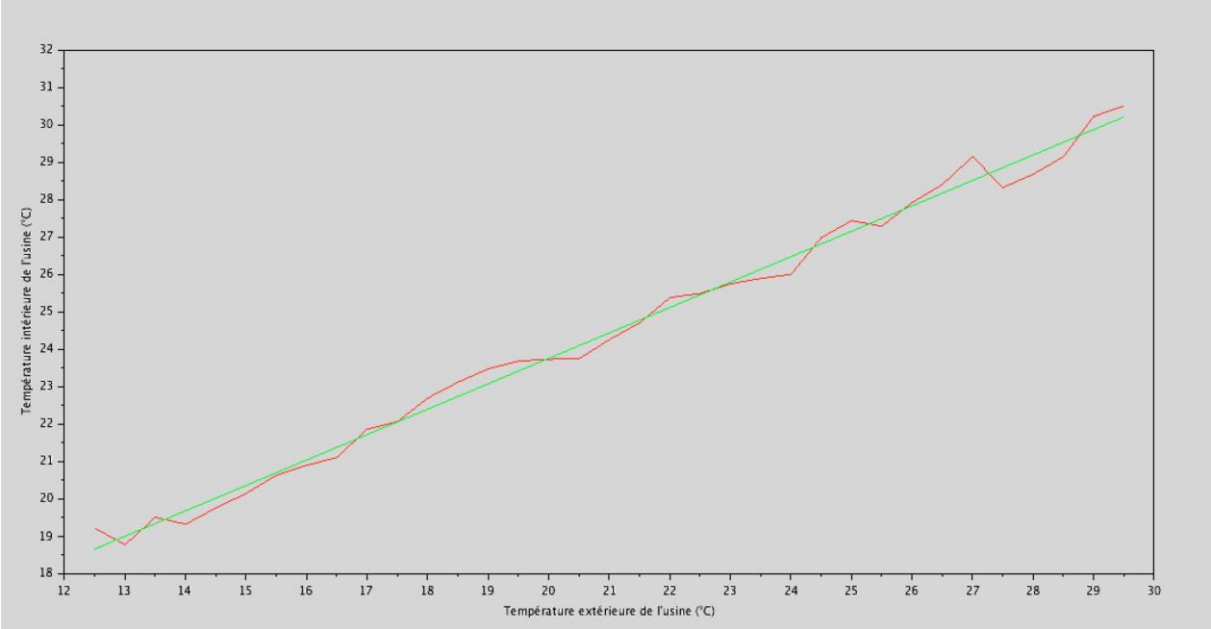
Afin d'obtenir un couple constant quelle que soit la fréquence, il faut faire varier la tension d'alimentation dans les mêmes proportions que la fréquence afin que le rapport U/f reste constant.
On dit que le moteur est commandé avec une loi en : rapport U/f constant.

Annexe 3 : Visuel d'une carte ELAU MC-4

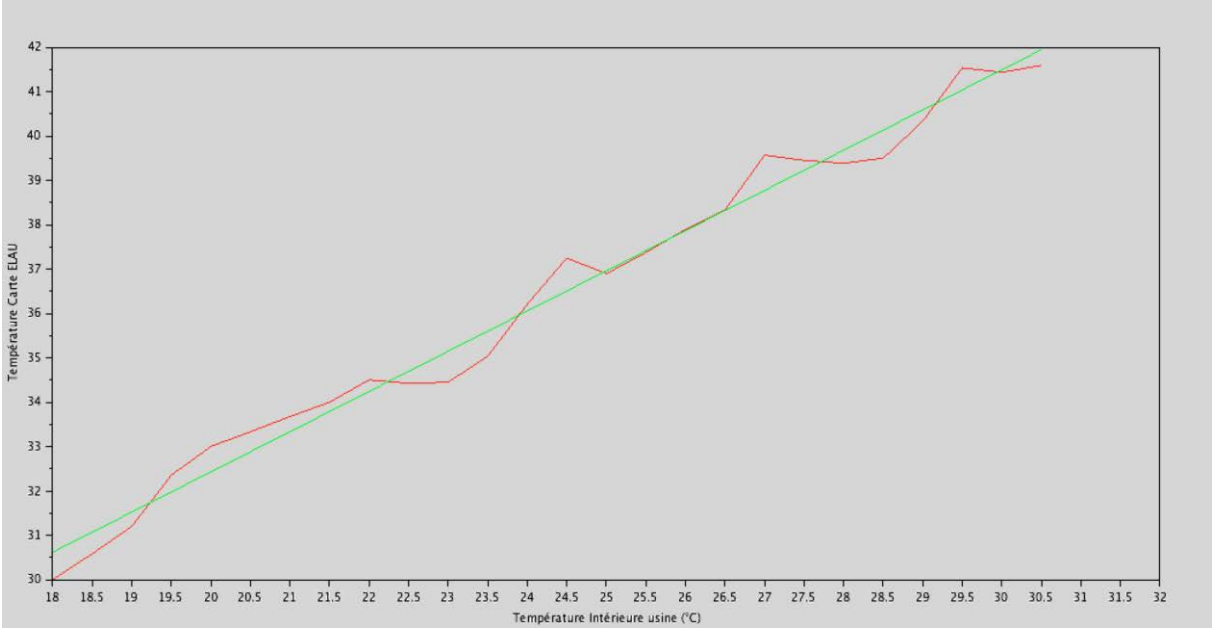
Annexe 4 : Schéma dimensionnel d'une carte ELAU MC-4



Annexe 5 : Graphique illustrant le lien entre température extérieure et température intérieure



Annexe 6 : Graphique illustrant le lien entre température intérieure et température des armoires électrique de la ligne FR1



RÉSUMÉ. Ce rapport présente le travail effectué de mars à juillet 2014 dans la société Delipapier, situé à Frouard. Delipapier produit du papier-toilette, de l'essuie-tout et des mouchoirs à usages sanitaires et hygiéniques. Leurs outils de production allient mécanique et électronique et le département maintenance est confronté depuis quelques années à un taux de pannes important sur un modèle de carte électronique de puissance servant au control d'axe moteur. Ils ont besoin qu'une étude soit menée afin de revenir à un taux de pannes normal, semblable au reste des équipements électroniques. Ils souhaitent qu'une méthode de pronostic soit développé afin d'assurer la surveillance de cartes de puissance. Afin de répondre à ce besoin, la situation existante a été formalisée et analysée. Des composants critiques ont pu être identifié et un prototype d'un programme de pronostic a été réalisé afin de tenter d'appréhender le plus justement l'usure de ces composants. En parallèle, l'étude a permis de comprendre les causes principale d'usure prématurée des cartes de puissance : la chaleur. Des modifications du système de refroidissement des armoires électriques ont été réalisées ; des climatiseurs ont remplacés les ventilateurs qui équipaient les armoires. Pour finir, une stratégie de maintenance a été développée pour améliorer la maintenance de l'électronique de puissance et servir de point de départ à la mise en place d'une maintenance prévisionnelle.

MOTS-CLÉS: pronostic, maintenance prévisionnelle, électronique de puissance, condensateur électrolytique,

---

ABSTRACT. This report presents the work carried out from March to July 2014 in the company Delipapier, located in Frouard, France. Delipapier produce toilet paper, paper towels and handkerchiefs to all sanitary and hygienic purposes. Their production combines mechanical and electronic equipments. The maintenance department has been recently facing a significant failure rate on a specific electronic power board used to control the motor shaft. They have set up a study in order to reach a normal failure rate, similar to the rest of electronic equipments. They want to develop a method of prognosis to supervise power boards. To reach this target, the current situation was formalized and analyzed. Critical components were identified and a prototype of prognosis program has been made to more accurately understand the wear of these components. In parallel, the study has shown the main cause of premature wear of power cards: heat. Changes in the cooling system control cabinets were performed; air conditioners have replaced the fans that equipped cabinets. Finally, a maintenance strategy has been developed to improve the maintenance of power electronic equipments and serves as a starting point for the development of a predictive maintenance method.

KEYWORDS : prognosis, predictive maintenance, power electronics, electrolytic capacitor

---