



**HAL**  
open science

# Methodes et outils d'aide au diagnostic et à la maintenance des tableaux électriques généraux par le suivi des grandeurs physiques caractéristiques et de leur fonctionnement

Kahan N'Gouan N'Guessan

► **To cite this version:**

Kahan N'Gouan N'Guessan. Methodes et outils d'aide au diagnostic et à la maintenance des tableaux électriques généraux par le suivi des grandeurs physiques caractéristiques et de leur fonctionnement. Sciences de l'ingénieur [physics]. Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 2007. Français. NNT: . tel-00272917

**HAL Id: tel-00272917**

**<https://theses.hal.science/tel-00272917>**

Submitted on 13 Apr 2008

**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.

**INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE GRENOBLE**

*N° attribué par la bibliothèque*

□□□□□□□□□□

**THESE**

pour obtenir le grade de

**DOCTEUR DE L'INP Grenoble**

**Spécialité :** « Génie Electrique »

préparée au laboratoire de Génie Electrique de Grenoble (UMR 5269 INPG-UJF-CNRS),

dans le cadre de **l'Ecole Doctorale** « *Electronique, Electrotechnique, Automatique & Traitement du Signal* »

présentée et soutenue publiquement

par

Kahan N'GUESSAN

le 07 décembre 2007

METHODES ET OUTILS D'AIDE AU DIAGNOSTIC ET A LA MAINTENANCE DES  
TABLEAUX ELECTRIQUES GENERAUX PAR LE SUIVI DES GRANDEURS  
PHYSIQUES CARACTERISTIQUES ET DE LEUR FONCTIONNEMENT

***DIRECTEUR DE THESE :*** *ROGNON Jean-Pierre*

***CO-DIRECTEUR(S):*** *ROSTAING Gilles*

**JURY**

M. Guy CLERC , Président  
M. Guy CLERC , Rapporteur  
M. Mohamed BENBOUZID , Rapporteur  
M. Jean-Pierre ROGNON , Directeur de thèse  
M. Gilles ROSTAING, Albert FOGGIA, Eric JOUSEAU , Co-encadrants



## Remerciements

Je tiens vivement à remercier :

**Jean-Pierre ROGNON**, directeur adjoint de l'école centrale de Lyon, **Gilles ROSTAING**, maître de conférence à l'INP Grenoble, et **Albert FOGGIA**, professeur à l'INP Grenoble, pour l'intérêt particulier qu'ils ont porté à ce travail de thèse. Ils ont su me donner les directions scientifiques pertinentes. Jean-Pierre ROGNON et Gilles ROSTAING ont été respectivement directeur et codirecteur de cette thèse. Albert FOGGIA a participé de très près au pilotage des travaux. Ce dernier a suscité en moi un engouement à faire cette thèse pendant que j'effectuais mon stage de fin d'étude d'ingénieur. Je l'en remercie.

Je remercie tout particulièrement le professeur **Guy CLERC** de l'université de Lyon 1 et le professeur **Mohamed El Hachemi BENBOUZID** de l'université de Bretagne occidentale qui ont bien voulu accepter de juger ce travail de thèse en tant que rapporteurs. Leurs remarques très pertinentes ont permis d'améliorer la qualité du manuscrit final. Le professeur Guy CLERC a par ailleurs, fait l'honneur de présider le jury de cette thèse. Je le remercie sincèrement.

Je tiens également à remercier **Eric JOUSEAU** docteur ingénieur chez Schneider-Electric, pour son pragmatisme, son altruisme, et le temps incalculable qu'il a consacré à ce travail de thèse. Il a été un support et un soutien précieux sur tous les plans, du début à la fin de cette thèse.

J'aimerais remercier spécialement deux hommes qui ont eu suffisamment confiance en moi pour me confier ce travail de thèse : **Frédéric DUMAS** et **Jean-Christophe IANESELLI** chez Schneider-Electric, les initiateurs de cette thèse, sans qui je ne serais là à partager la joie d'une tâche accomplie. Frédéric DUMAS a su guider mes premiers pas durant cette thèse, me mettant en contact avec des personnes clés. C'est un responsable altruiste, plein d'idées innovantes, avec qui, il est plaisant de travailler et qui a beaucoup participé à mon épanouissement durant cette thèse. Jean-Christophe IANESELLI en tant que responsable du département auquel je fus affecté a défendu ce projet de thèse et a mis tous les moyens qu'il fallait pour sa réussite. Je leur en suis infiniment reconnaissant

Je remercie tous les experts de Schneider-Electric avec lesquelles j'ai eu des discussions techniques très constructives. Ces discussions m'ont permis de réunir un certain nombre de données nécessaires pour le développement des outils mis en place durant cette thèse. Je citerais parmi ces experts, **Christophe KILINDJIAN**, **Pascal LEPRETRE** et **Didier VANDOOREN**, ils ont tous manifesté un intérêt particulier à travailler sur ce sujet de thèse. Mille mercis à Christophe KILINDJIAN qui a bien voulu mettre à notre disposition le cœur de calcul de son logiciel EChaufPc®. Je remercie **Lehdi KISMOUNE** chez Schneider-Electric qui m'a prêté le matériel pour les essais sur le tableau OKKEN.

Je ne saurais oublier, **Florence FRANCOIS** ingénieur au G2ELAB que je remercie pour sa grande disponibilité et son apport notamment sur la prise en main de la technique des réseaux Bayésiens. C'est quelqu'un de très sympathique.

Remerciement spécial à **Daniel ROYE** et **Pierre GRANJON**, professeur et professeur assistant à l'INP Grenoble, tous deux pour leur sympathie, leur disponibilité et leurs aides notamment sur l'essai de vibration.

Je remercie **Sédic BACHA** et **Jean-Louis COULOMB** tous deux professeurs à l'INP Grenoble et responsables respectifs des équipes MAGE et SYREL du G2ELAB. Les différents séminaires auxquels j'ai été convié dans ces équipes m'ont beaucoup édifié.

Je remercie **Patrick AUDIFFRET** responsable du laboratoire d'essai d'échauffement chez Schneider-Electric à Montmélián qui acceptait chaque fois que besoin était, de me trouver des créneaux horaires dans son laboratoire malgré un taux de charge élevé.

Je dis un grand merci à **Jean-Yves BATAILLARD** chez Schneider-Electric pour sa gentillesse et son ingéniosité dans la construction des bancs d'essais.

Je profite aussi pour dire toute ma reconnaissance aux techniciens de laboratoire chez Schneider-Electric que sont **Serge BONENTE** aujourd'hui retraité, **Serge FORTUNA**, et **Lionel** pour l'aide qu'ils m'ont apporté durant les manipulations.

Une dédicace spéciale à toutes les personnes grâce à qui je me suis pleinement épanoui durant ces 3 années de thèse, Les membres de l'équipe des Services et Projets chez Schneider-Electric avec **Nathalie CADORIN** en particulier, mes amis et le personnel du G2ELAB, tous et toutes, pour leur convivialité.

Enfin un grand merci à **Danielle** pour son soutien moral.

*« Ce travail est un cadeau à ma mère  
Adjoua et mon père N'guessan »*

# SOMMAIRE

<b>INTRODUCTION .....</b>	<b>9</b>
---------------------------	----------

<b>CHAPITRE 1 :CONTEXTE DE L'ETUDE.....</b>	<b>15</b>
---	-----------

<b>I. PROBLEMATIQUE .....</b>	<b>15</b>
<b>II. LE TABLEAU ELECTRIQUE BASSE TENSION ET SES CONSTITUANTS .....</b>	<b>15</b>
1. L'ENVELOPPE .....	16
2. LES CLOISONNEMENTS INTERNES .....	16
3. LA DISTRIBUTION .....	17
4. L'APPAREILLAGE.....	17
5. LES CABLES DE RACCORDEMENTS CLIENTS .....	17
6. EXEMPLE DE TABLEAUX ELECTRIQUES .....	18
<b>III. ETAT DES LIEUX DES CAUSES DE DEFAILLANCES DES TABLEAUX ELECTRIQUES BT .....</b>	<b>18</b>
1. LES GRANDES FAMILLES DE CAUSES DE DEFAILLANCES DES TABLEAUX ELECTRIQUES .....	19
2. REPARTITION DES GRANDES FAMILLES DE DEFAILLANCES.....	20
<b>IV. DETECTION ET DIAGNOSTIC DES DEFAUTS DES TABLEAUX ELECTRIQUES PAR LA MESURE DE LA TEMPERATURE.....</b>	<b>21</b>
1. LA SURVEILLANCE THERMIQUE HIER ET AUJOURD'HUI .....	21
2. LA SURVEILLANCE THERMIQUE DE DEMAIN .....	22

<b>CONCLUSION .....</b>	<b>24</b>
-------------------------	-----------

<b>CHAPITRE 2 :LE CONTACT ELECTRIQUE ET LES ESSAIS DE MISE EN EVIDENCE DES PHENOMENES LIES A SA DEGRADATION.....</b>	<b>27</b>
--	-----------

<b>INTRODUCTION .....</b>	<b>27</b>
---------------------------	-----------

<b>I. GENERALITES SUR LE CONTACT ELECTRIQUE.....</b>	<b>28</b>
1. LES CONTACTS DANS LE TABLEAU ELECTRIQUE .....	29
2. UTILISATION DES FORMULES DE RESISTANCES DE CONTACTS DANS LE CAS REEL .....	29
<b>II. LES ESSAIS DE MISE EN EVIDENCES DES PHENOMENES PHYSIQUES LIES A LA DEGRADATION DES CONTACTS.....</b>	<b>30</b>
1. ESSAI DE MISE EN EVIDENCE DU BOUCHON THERMIQUE.....	30
2. ESSAI DE DESSERRAGE PROGRESSIF .....	35
3. ESSAI DE VIEILLISSEMENT ACCELERE .....	39
4. ESSAI VIBRATOIRE.....	41

<b>CONCLUSION .....</b>	<b>45</b>
-------------------------	-----------

<b>CHAPITRE 3 :LA THERMIQUE DANS LE TABLEAU ELECTRIQUE ET LE POSITIONNEMENT DES CAPTEURS DE TEMPERATURE.....</b>	<b>48</b>
--	-----------

<b>INTRODUCTION .....</b>	<b>48</b>
---------------------------	-----------

<b>I. LA THERMIQUE DANS L'ARMOIRE ELECTRIQUE.....</b>	<b>49</b>
1. LA CONDUCTION DANS L'ARMOIRE ELECTRIQUE.....	49

2.	LA CONVECTION DANS L'ARMOIRE ELECTRIQUE .....	50
3.	LE RAYONNEMENT DANS L'ARMOIRE ELECTRIQUE .....	50
<b>II.</b>	<b>LE POSITIONNEMENT DES CAPTEURS DE TEMPERATURES DANS L'ARMOIRE ELECTRIQUE .....</b>	<b>50</b>
1.	LES CRITERES DE PRIORITE.....	51
2.	TABLEAU DES PRIORITES DANS LA POSE DES CAPTEURS.....	55
3.	AUTRES PRECAUTIONS A PRENDRE DANS LA POSE DES CAPTEURS .....	56
4.	LA QUESTION DU NOMBRE DE CAPTEURS.....	57
<b>CONCLUSION .....</b>		<b>58</b>
<b>CHAPITRE 4 :SYSTEME DE DETECTION.....</b>		<b>62</b>
<b>INTRODUCTION : .....</b>		<b>62</b>
<b>I.</b>	<b>INDICATEUR DE FRANCHISSEMENT DES SEUILS DE TEMPERATURES .....</b>	<b>63</b>
<b>II.</b>	<b>INDICATEUR DE VIEILLISSEMENT .....</b>	<b>65</b>
1.	ALGORITHME DE CALCUL DU FACTEUR DE VIEILLISSEMENT .....	66
2.	EXEMPLE DE SIMULATION DU CALCUL DE VIEILLISSEMENT .....	68
<b>III.</b>	<b>DETECTION DE L'ECHAUFFEMENT ANORMAL PAR COMPARAISON A UN MODELE PHYSIQUE .....</b>	<b>70</b>
1.	ETAT DES LIEUX DES LOGICIELS DE SIMULATION A NOTRE DISPOSITION.....	70
2.	DETECTION D'ECHAUFFEMENT ANORMAL A L'AIDE D'ECHAUFPC .....	74
3.	DE ECHAUFPC A ECHAUFWEB .....	79
<b>IV.</b>	<b>DETECTION DE L'ECHAUFFEMENT ANORMAL PAR LES RESEAUX DE NEURONES.....</b>	<b>81</b>
1.	DES NEURONES BIOLOGIQUES AUX NEURONES ARTIFICIELS.....	81
2.	L'APPRENTISSAGE DES RESEAUX DE NEURONES .....	83
3.	APPLICATION DES RESEAUX DE NEURONES A LA DETECTION AUTOMATIQUE DE CONTACTS DEFAILLANTS	85
<b>CONCLUSION .....</b>		<b>88</b>
<b>CHAPITRE 5 :SYSTEME DE DIAGNOSTIC .....</b>		<b>92</b>
<b>INTRODUCTION : .....</b>		<b>92</b>
<b>I.</b>	<b>LES RESEAUX BAYESIENS.....</b>	<b>93</b>
1.	UN EXEMPLE SIMPLE DE RESEAU BAYESIEN .....	94
<b>II.</b>	<b>LA MISE EN ŒUVRE DU RESEAU BAYESIEN POUR LE DIAGNOSTIC DE L'ARMOIRE ELECTRIQUE.....</b>	<b>97</b>
1.	ACQUISITION D'INFORMATIONS ET CREATION DE GRAPHE.....	97
2.	REPLISSAGE DES TABLES DE PROBABILITES CONDITIONNELLES.....	102
<b>III.</b>	<b>EVALUATION ET UTILISATION DU RESEAU BAYESIEN .....</b>	<b>105</b>
1.	EVALUATION .....	105
2.	UTILISATION DU RESEAU BAYESIEN .....	107
3.	ADAPTATION AUTOMATIQUE DES PROBABILITES DES RESEAUX BAYESIENS PAR UN PROCESSUS D'APPRENTISSAGE .....	111
<b>CONCLUSION .....</b>		<b>114</b>
<b>CHAPITRE 6 :LE SYSTEME COMPLET : EXEMPLE D'APPLICATION .....</b>		<b>118</b>
<b>INTRODUCTION .....</b>		<b>118</b>

<b>I. TABLEAU OKKEN EN CONDITION REELLE D'UTILISATION.....</b>	<b>119</b>
<b>II. POSITIONNEMENT DES CAPTEURS .....</b>	<b>120</b>
<b>III. MODELISATION ET DETECTION .....</b>	<b>121</b>
1. MODELISATION .....	121
2. DETECTION.....	124
<b>IV. DIAGNOSTIC.....</b>	<b>127</b>
<b>V. ETAT DES LIEUX DU SYSTEME GLOBAL .....</b>	<b>129</b>
<b><u>CONCLUSION .....</u></b>	<b><u>132</u></b>
<b><u>CONCLUSION GENERALE .....</u></b>	<b><u>133</u></b>
<b><u>ANNEXES .....</u></b>	<b><u>137</u></b>
<b>ANNEXE 1 : RESISTANCES (ÉLECTRIQUE ET THERMIQUE) D'UN CONTACT. ....</b>	<b>139</b>
1. LE PASSAGE DU COURANT A L'INTERFACE D'UN CONTACT ELECTRIQUE .....	139
2. LE PASSAGE DU FLUX THERMIQUE A L'INTERFACE D'UN CONTACT ELECTRIQUE .....	140
<b>ANNEXE 2 : EXEMPLE DE CALCUL DE LA RESISTANCE THERMIQUE.....</b>	<b>143</b>
<b>ANNEXE 3 : RESULTATS DE L'ESSAI DE DESSERRAGE PROGRESSIF SUR LES CONTACTS DE TYPE BOULONNE. ....</b>	<b>145</b>
<b>ANNEXE 4 : THEORIE DE TRANSFERT THERMIQUE.....</b>	<b>147</b>
1. CONDUCTION.....	147
2. CONVECTION .....	148
3. RAYONNEMENT .....	148
<b>ANNEXE 5 : ALGORITHME DE VIEILLISSEMENT.....</b>	<b>151</b>
<b>ANNEXE 6 : TABLES DE PROBABILITES ASSOCIEES AUX VARIABLES INTERMEDIAIRES ET TERMINALES DU RESEAU BAYESIEN.....</b>	<b>153</b>
<b>ANNEXE 7 : TABLES DES PARAMETRES DIMENSIONNELS ECHAUFWEB EN FONCTION DE LA SECTION DES CABLES ISOLES .....</b>	<b>155</b>
<b>ANNEXE 8 : ANALYSE DE SENSIBILITE SUR LES TEMPERATURES RESULTANTES DU MODELE THERMIQUE DE DETECTION PAR RAPPORT AUX ERREURS SUR LES DIMENSIONS DE JEUX DE BARRES. ....</b>	<b>157</b>
<b><u>BIBLIOGRAPHIE .....</u></b>	<b><u>159</u></b>
<b><u>BIBLIOGRAPHIE .....</u></b>	<b><u>161</u></b>



# INTRODUCTION

Aujourd'hui, que ce soit dans l'industrie lourde ou dans le tertiaire, les usagers d'électricité ont de plus en plus le souci de se garantir une continuité de service, compte tenu des pertes souvent énormes engendrées par un arrêt de fonctionnement de leur installation.

Dans toute installation électrique, l'énergie provenant du distributeur d'électricité, après la transformation MT/BT, est acheminée vers les utilisateurs finaux en passant par un ou plusieurs tableaux électriques (Figure 1).

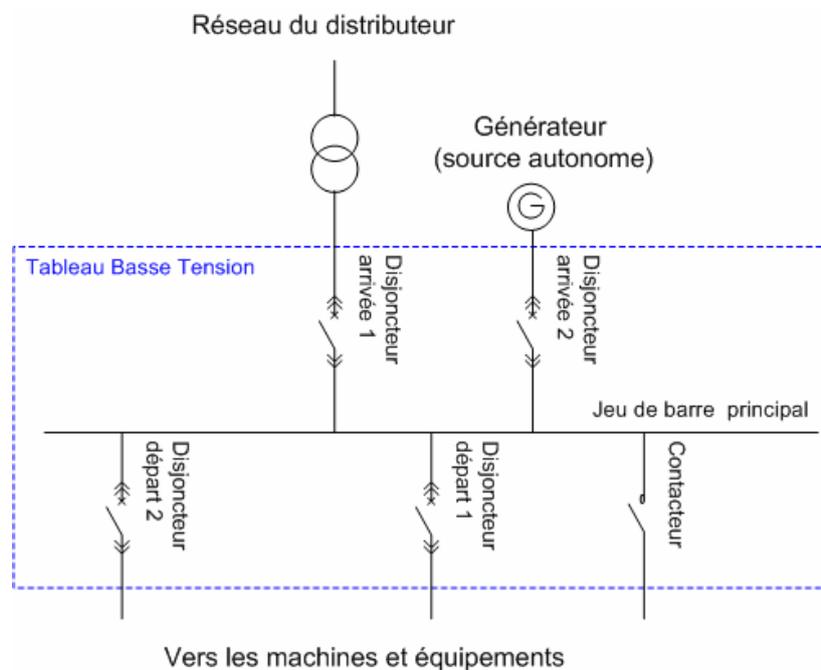


Figure 1 : Exemple de réseau électrique industriel simplifié.

Le tableau électrique regroupe une grande partie de l'appareillage et des éléments servant à la répartition et la mesure de l'énergie électrique ainsi qu'à la protection des équipements et de leurs

utilisateurs. Ce regroupement d'appareillages et éléments, tous d'une importance capitale pour le bon fonctionnement de l'application en aval, fait du tableau électrique basse tension un point critique du réseau électrique. C'est donc un élément clé de la distribution électrique. De son bon fonctionnement, dépend la sécurité et la disponibilité de l'ensemble de l'installation électrique (en aval).

Les constructeurs d'équipements électriques tels que Schneider-Electric, possédant la maîtrise de la mise en œuvre des tableaux électriques, ont toujours eu le souci de répondre à ce besoin de sécurité et de disponibilité. Ils préconisent donc une stratégie de maintenance préventive (agir avant le dysfonctionnement) par opposition à la maintenance curative (agir après le dysfonctionnement). Par ailleurs, il existe plusieurs niveaux de maintenance préventive (Figure 2).

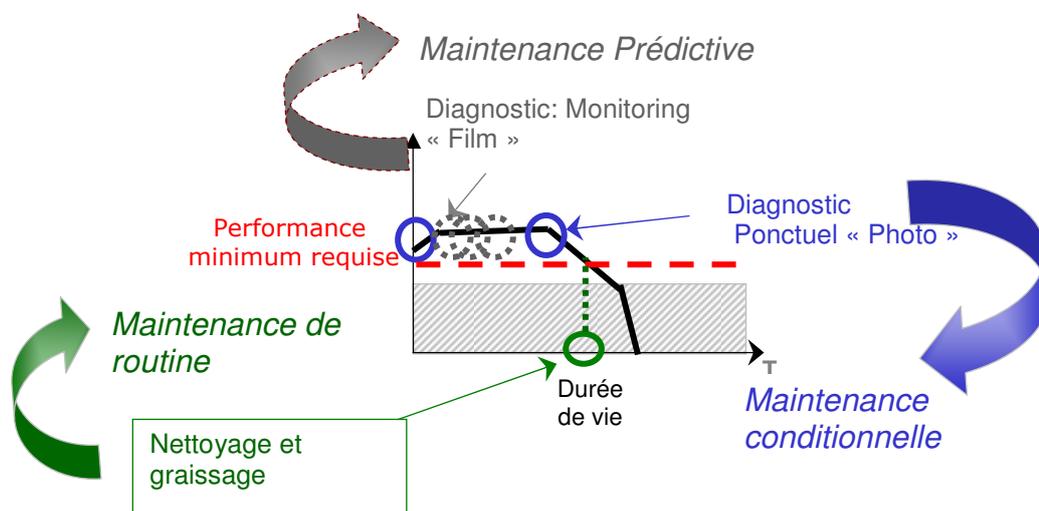


Figure 2 : Différents types de maintenances préventives.

Schneider-Electric, comme tous les constructeurs d'équipements, propose systématiquement à ses clients un premier niveau de maintenance préventive dite de routine. Il se fait à intervalle de temps régulier afin de garantir les performances minimales, dans la durée de vie des équipements, cela à condition qu'ils soient utilisés dans les conditions normales.

Dans des cas d'installations nécessitant un haut niveau de fiabilité, de disponibilité ou de performances, les constructeurs, dont Schneider-Electric, peuvent prescrire un plan de maintenance dont l'objectif est d'agir après avoir détecté l'amorce d'une dégradation, avant même que l'équipement ne soit hors service. Contrairement à la maintenance de routine, cette dernière est initiée par le constat d'un début de détérioration. Dans cette catégorie, nous pouvons distinguer deux sous niveaux, la maintenance conditionnelle et la maintenance prédictive. Dans le premier cas, les inspections sont espacées (mois, années) et permettent de détecter des états de dégradation

avancée. Dans le deuxième cas, les inspections plus fréquentes (minute, heure, jour) permettent de détecter un état de dégradation moins avancé. Toutefois la frontière entre ces deux types de maintenances reste floue.

Schneider-Electric développe des outils aidant aux différents types de maintenances qu'il propose. Le groupe offre déjà à ses clients la possibilité de suivre leur parc installé à travers des informations concernant la gestion de la maintenance de routine de leur installation. Ces clients peuvent aussi accéder à des grandeurs électriques telles que la puissance consommée, le courant, la tension, et le taux d'harmoniques. Toutes ces informations sont rapatriées sur un serveur et traitées. Les experts Schneider-Electric les utilisent pour des recommandations dans le but de mener des actions préventives, qui vont dans le sens de garantir une énergie beaucoup plus fiable, disponible et moins chère.

Dans cette dynamique, la division Service de Schneider-Electric, dans sa stratégie de développement des services prédictifs, a initié cette thèse d'aide à la maintenance des tableaux électriques par le suivi des grandeurs physiques. L'idée est donc de se servir des mesures réalisées, et éventuellement d'autres grandeurs physiques, pour aider à la maintenance prédictive des tableaux électriques [1]-[2].

Une enquête impliquant des experts Schneider-Electric nous révèle que la principale cause de défaillance des tableaux électriques est le « défaut de raccordement » conduisant à un échauffement local de la connexion et pouvant dégénérer en un amorçage. La plupart des autres causes de défaillance (surcharges, harmoniques, mauvaise ventilation), conduisent également à une élévation de la température. Dès lors, la température semble être une grandeur physique qui pourrait aider à détecter et diagnostiquer un ensemble important des modes de défaillances des tableaux électriques.

Ainsi, le but premier de cette thèse est d'élaborer un outil de détection et de diagnostic des tableaux électriques, basé principalement sur la mesure de la température, mais également des autres grandeurs accessibles.

Ce document est le rapport de cette thèse. Il est organisé de la façon suivante :

- Le chapitre 1 situe le contexte général et la problématique de notre étude.
- Le chapitre 2 présente des expériences de compréhension des principaux défauts des tableaux électriques.
- Le chapitre 3 donne une aide sur l'emplacement des capteurs de température dans le tableau électrique en se basant sur les résultats des expériences.

- Le chapitre 4 détaille la détection des défauts proprement dite. Deux méthodes ont été testées. La première est la comparaison du comportement thermique de l'armoire par rapport à un modèle physique du tableau supposé sain. La deuxième utilise la capacité d'apprentissage des réseaux de neurones pour reconnaître les cas de défaillances.
- Le chapitre 5 traite du diagnostic pour expliquer les cas de défaillance. L'outil de diagnostic permet aussi de faire une analyse du risque de défaillance. La technique des réseaux Bayésiens est utilisée à cet effet.
- Le chapitre 6 vise à donner une vue d'ensemble, sur un cas pratique, des différents outils développés.

# Chapitre 1

## CONTEXTE DE L'ETUDE

---



# CONTEXTE DE L'ETUDE

## I. Problématique

Notre étude s'insère dans un contexte général qui est celui de la disponibilité de l'énergie électrique. En effet ce thème prend de plus en plus d'ampleur dans le domaine industriel et tertiaire du fait des coûts occasionnés par l'arrêt d'un service ou d'une chaîne de production. A titre indicatif, pour beaucoup d'installations industrielles le coût horaire d'arrêt est supérieur à 10.000\$/h. Jusqu'à ce jour, pour pallier ce problème, les industriels ont recours à de la maintenance préventive à intervalles de temps réguliers. Il est vrai que cette pratique permet d'éviter un bon nombre de défaillances, mais elle reste chère et nécessite souvent des arrêts de l'installation électrique. Aujourd'hui il est de plus en plus question de la maintenance prédictive basée sur la connaissance continue de l'état du système [3]. Ceci dans le but de réduire encore plus les coûts liés à la maintenance, et d'augmenter la disponibilité de l'équipement électrique. Aujourd'hui la venue de capteurs et de composants électriques communicants rend cette pratique d'autant plus viable.

Nous nous intéressons particulièrement au tableau électrique Basse Tension (BT), point de passage quasi obligatoire de l'énergie électrique.

Avant de développer notre plan d'action pour aider à sa maintenance prédictive, présentons ce qu'est un tableau électrique et faisons l'état des lieux des causes de ses défaillances.

## II. Le tableau électrique Basse tension et ses constituants

Le tableau électrique sert à la distribution de l'énergie électrique depuis le point d'arrivée de cette énergie jusqu'aux équipements utilisateurs. Il est composé d'une enveloppe et d'un ensemble d'éléments dont le rôle est d'assurer la répartition de l'énergie, la protection, et le contrôle de

l'installation électrique en aval. Ces fonctions du tableau sont réalisées par un certain nombre de constituants et une architecture particulière. Roland Auber dans [4] donne une description exhaustive des tableaux électriques. Ici nous nous contentons d'en souligner quelques traits qui nous semblent importants.

## 1. L'enveloppe

L'enveloppe d'un tableau électrique assure la protection des personnes contre les chocs électriques. Elle protège aussi le matériel contre les influences externes (poussières conductrices, environnement chimique agressif etc.).

## 2. Les cloisonnements internes

Des écrans et des cloisons contribuent à éviter les contacts avec des parties actives (jeu de barres sous tension par exemple), augmentant ainsi la protection des personnes. Ils assurent la protection contre le passage de corps étrangers entre les différents compartiments, et permettent de réduire les risques d'amorçages. Des systèmes de ventilation forcée ou naturelle peuvent être installés dans le tableau en vue de répondre au problème d'évacuation de chaleur pouvant être engendré par ces cloisons. La norme IEC-60439.1 définit précisément les degrés de cloisonnement interne à travers la notion de forme.

Forme 1 : Absence totale de cloisonnement

Forme 2 : Séparation entre jeux de barres et unités fonctionnelles

Forme 3 : En plus de la forme 2, séparation de toutes les unités fonctionnelles entre elles.

Forme 4 : En plus des caractéristiques de la forme 3, séparation des bornes pour conducteurs extérieurs associés à une unité fonctionnelle de celles de toutes les autres unités fonctionnelles et des jeux de barres.

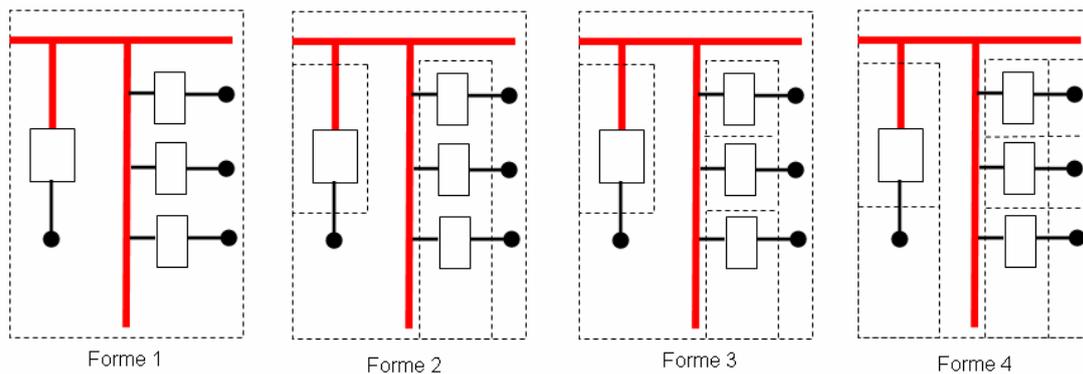


Figure 3 : Différents types de « formes » d'un tableau électrique

### 3. La distribution

La distribution est constituée de jeux de barres de distribution horizontales et verticales et de connecteurs spécifiques permettant la répartition de l'énergie électrique vers les différents appareillages. Leurs supports doivent tenir les efforts électrodynamiques et les contraintes thermiques.

### 4. L'appareillage

L'ensemble de l'appareillage est constitué de dispositifs pour la protection, la commande, le sectionnement et la signalisation. Cet appareillage peut, selon les cas, être regroupé en unités fonctionnelles lorsqu'il réalise une fonction spécifique, par exemple la protection d'un départ, la commande d'un moteur.

### 5. Les câbles de raccordements clients

Les raccordements se font directement depuis les bornes de l'appareillage de protection ou par l'intermédiaire de dispositifs de raccordements séparés. Les câbles de raccordements clients (ou départs clients) assurent l'alimentation en énergie de la charge terminale (moteur par exemple).

## 6. Exemple de tableaux électriques

Pour répondre au besoin du marché, Schneider-Electric fournit des armoires et tableaux électriques BT d'architectures et de puissances variées. A titre indicatif, nous pouvons citer,

- L'armoire « Prisma Plus », destinée aux bâtiments du tertiaire, allant jusqu'à 3200A de courant assigné.
- Le tableau « Okken » destiné aux applications de l'industrie lourde, allant jusqu'à 7300A de courant assigné.

Ci-dessous nous pouvons voir une armoire « OKKEN » avec les différentes parties repérées.

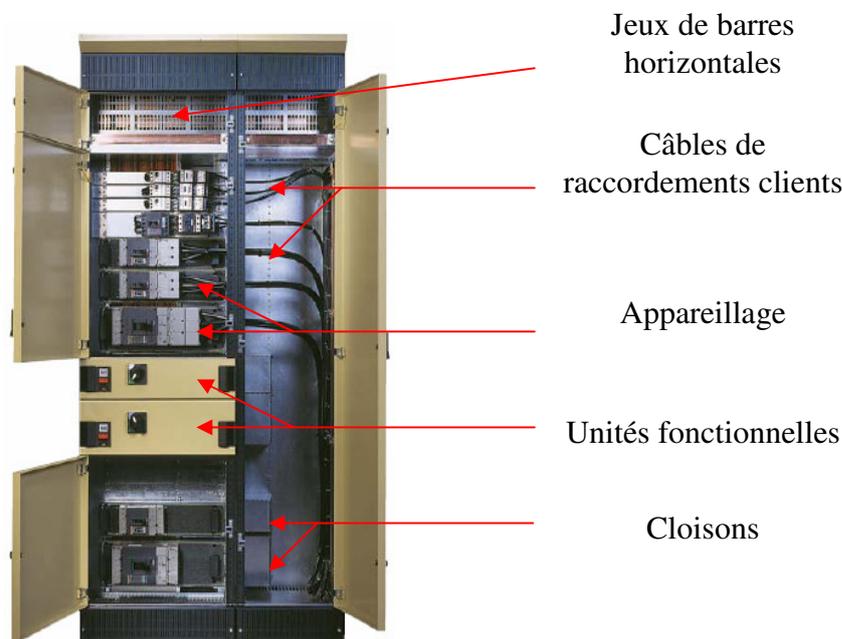


Figure 4 : Structure du tableau électrique « OKKEN » de Schneider-Electric

## III. Etat des lieux des causes de défaillances des tableaux électriques BT

Comme tout système électrique, le tableau subit l'influence du milieu extérieur dans lequel il opère. Il subit aussi l'influence d'autres phénomènes liés à son utilisation proprement dite. Ces influences

se traduisent par un vieillissement accéléré ou par des dégradations pouvant aboutir au dysfonctionnement voire à l'arrêt total du tableau électrique.

Il est donc vital de recourir à une maintenance prédictive. Par ailleurs, le problème de la maintenance prédictive impose d'avoir identifié au préalable les différentes causes de dégradations.

Ainsi, nous avons mené une étude d'identification et de quantification des causes de défaillances des tableaux électriques. Elle a consisté à interroger des experts Schneider-Electric. Six entretiens ont été réalisés. Au cours de ces entretiens il était question, pour les experts, de lister les causes de défaillances des armoires électriques et leur pourcentage d'apparition. Cette étude nous a permis d'identifier les grandes familles des causes de défaillances des tableaux électriques et les tendances en termes d'apparitions.

Dans le chapitre suivant nous donnons les résultats de cette enquête.

## **1. Les Grandes familles de causes de défaillances des tableaux électriques**

### **1.1. Environnement / Pollution**

Cette famille regroupe les causes de défaillances liées à l'environnement dans lequel baignent les composants du tableau électrique.

Les environnements humides favorisent l'oxydation des parties métalliques du tableau.

Les environnements poussiéreux ou corrosifs, comme ceux rencontrés dans les papeteries par exemple, attaquent les contacts électriques. Cela entraîne une augmentation de la résistance électrique du contact pollué.

### **1.2. Défauts de raccordements**

Ces défauts de raccordements regroupent le mauvais serrage des connexions des câbles et jeux de barres. Ils regroupent aussi les mauvaises connexions dues à une visserie qui n'est pas adaptée. Un défaut de raccordement contribue à augmenter la résistance électrique de la connexion.

### **1.3. Défauts appareillages et ventilations**

Cette famille regroupe les défaillances du système de ventilation ou des appareils installés dans le tableau électrique. Selon les experts, une mauvaise ventilation ou un défaut au niveau de l'appareillage peut se traduire par des déclenchements intempestifs des appareils, dus à une élévation de la température ambiante du tableau électrique.

## 1.4. Surcharges

Dans la famille des surcharges, nous considérons uniquement les surcharges de courant. Ces surcharges peuvent être dues à un mauvais dimensionnement des jeux de barres et autres appareillages. Elles peuvent être aussi dues à un ajout de charges supplémentaires par rapport à ce pour quoi le tableau a été dimensionné au départ. Nous intégrons dans cette famille les surcharges du neutre due à la présence d'harmoniques de rang 3.

## 1.5. Objets oubliés ou intrusions extérieures

L'intrusion d'animaux dans les tableaux (souris, insectes, oiseaux) est une des causes de court-circuit. L'oubli de clés et autres objets conducteurs dans les tableaux, par exemple après une opération de maintenance, peut aussi être la cause d'un court circuit.

# 2. Répartition des grandes familles de défaillances

Les entretiens réalisés auprès des six experts révèlent que parmi les familles de causes de défaillances des tableaux, viennent d'abord les défauts de raccordements, puis les surcharges. Sans qu'il faille attacher une signification statistique à ces chiffres, la part de ces causes dans l'ensemble des causes de défaillances est respectivement de 34% pour les défauts de raccordements et de 21 % pour celles dues aux surcharges. Par ailleurs, nous pouvons remarquer que la plupart des causes de défaillances conduisent à une élévation en température.

**Erreur ! Liaison incorrecte.**

Figure 5 : Répartition des causes de défauts des tableaux électriques

En effet, les environnements agressifs ou les défauts de raccordements, se traduisent par une dégradation des contacts électriques. Il s'en suit une augmentation de la résistance de contact qui entraîne un échauffement local par effet joule au passage du courant. Les défauts de ventilation sont également susceptibles d'occasionner une élévation de la température ambiante du tableau. Les surcharges surchauffent les câbles, les jeux de barres et les appareillages.

La température semble donc être une grandeur physique permettant de superviser une part importante des causes de défaillances.

# **IV. Détection et Diagnostic des défauts des tableaux électriques par la mesure de la température**

## **1. La surveillance thermique hier et aujourd'hui**

Les deux pratiques encore largement utilisées jusqu'à ce jour, pour prédire les risques de défaillance de l'armoire électrique créés par un échauffement excessif, sont :

- L'inspection régulière avec utilisation des 5 sens de l'Homme.
- L'inspection régulière avec utilisation de la thermographie infrarouge

En ce qui concerne la première pratique qui est l'utilisation des sens, il est commun de voir l'utilisateur de tableau électrique faire le tour des armoires, les ouvrir et les inspecter, à la recherche d'un câble qui fond, d'un jeu de barre qui change de couleur, ou pour détecter l'odeur d'un composant qui brûle ou qui surchauffe. Ainsi les sens les plus utilisés sont, la vue, l'odorat, et le toucher. De nos jours cette pratique laisse la place à l'inspection thermographique infrarouge.

La thermographie infrarouge permet de localiser les points chauds à partir d'une photo thermique [5]-(Figure 6). Tout objet à température normale (supérieure au zéro absolu) émet un rayonnement dans le domaine infrarouge dépendant de sa température. C'est cette propriété qui est utilisée par l'électronique des détecteurs infrarouges pour donner la température d'un objet en captant l'énergie infrarouge qu'il émet.

La première difficulté rencontrée par cette technique dans le cas du tableau électrique est l'accès à certains endroits du tableau et l'obligation de démonter tous les caches et plastrons afin de viser l'élément dont on veut connaître la température. Aussi, certains ont recourt à des hublots spéciaux qui laissent passer les rayons infrarouges. Mais cette solution demeure très chère et n'est pas forcément efficace car les tableaux sont de plus en plus cloisonnés, réduisant ainsi la portée du hublot sur les éléments internes susceptibles de surchauffer.

Par ailleurs, la mesure par caméra infrarouge exige la maîtrise de certains fondamentaux de phénomènes thermiques. Il est très facile de s'en servir pour faire de belles images dont les valeurs

de températures sont fausses. C'est pourquoi, ces mesures doivent être faites et interprétées par des professionnels qualifiés.

Enfin, il faut noter, le caractère ponctuel de cette inspection, c'est-à-dire qu'elle ne donne qu'une photo de l'état du système à un instant donné.

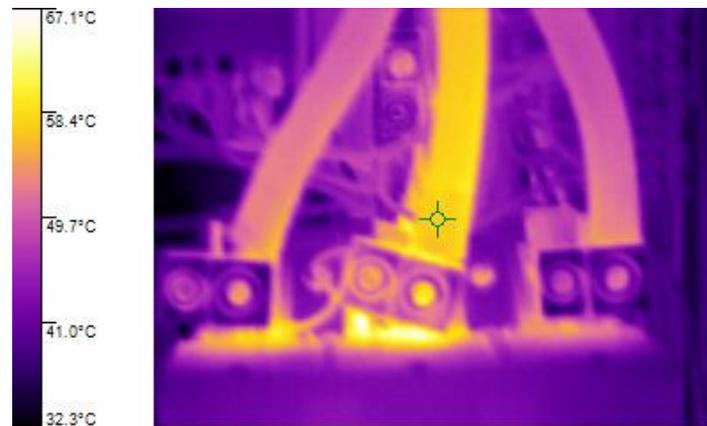


Figure 6 : Exemple de mesure infrarouge sur des câbles.

## 2. La surveillance thermique de demain

Nous voulons avoir une surveillance continue du tableau électrique. Elle nous permettra d'analyser plus efficacement les éventuelles dérives et de planifier des actions de maintenances prédictives le plus tôt possible. Les outils d'aide à la détection et au diagnostic réalisés devront s'appuyer sur la chaîne logistique d'acquisition des données via le Web déjà existante à Schneider-Electric (Figure 7). Cette chaîne se compose d'éléments communicants :

- Les « Micrologics » communicants : éléments intégrés au disjoncteur pour la mesure du courant.
- Les « PowerMeters » pour la mesure des courants, des tensions et des taux d'harmoniques.
- Les capteurs de température sans fil.
- Un serveur de stockage de données.

L'utilisation des capteurs de température sans fil a plusieurs avantages : en plus d'être une solution moins chère, ils se posent facilement dans des endroits difficiles d'accès [6]. Toutes les mesures faites in situ devront être rapatriées sur le serveur de traitement de données. Dans notre étude nous considérons donc que nous disposons de ces données. Nous nous attarderons donc sur leur exploitation. Une fois les données exploitées, les courbes et les conclusions résultantes seraient consultables sur les postes autorisés dans le monde entier au travers d'internet.

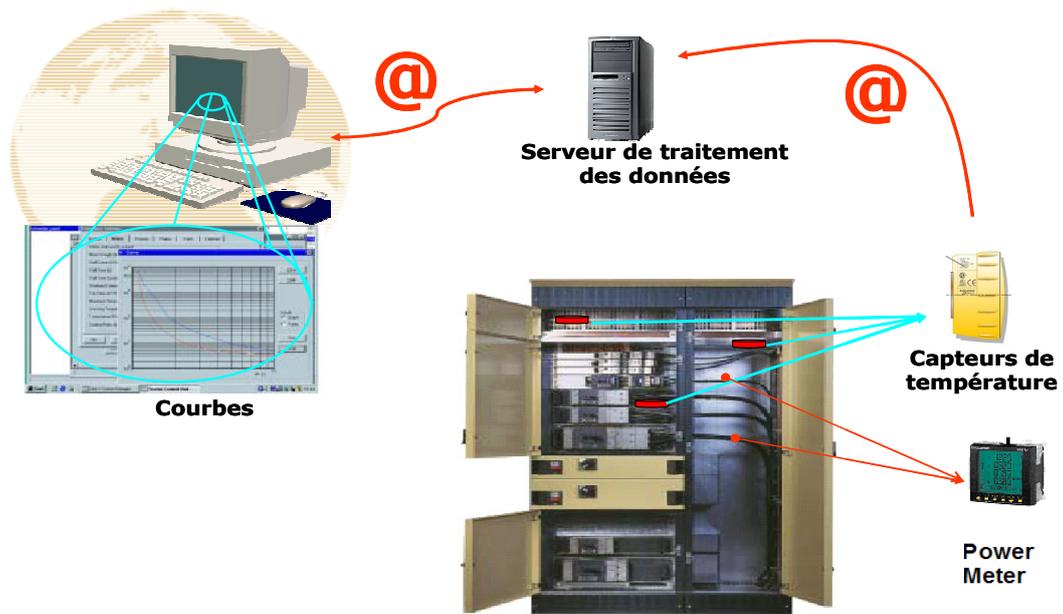


Figure 7 : Chaîne de monitoring du tableau électrique

# CONCLUSION

Il ressort de l'analyse des entretiens avec les experts que l'une des principales causes de défaillance des tableaux est le mauvais raccordement. Il faut noter que certaines des causes mises en évidence ne pourront pas être traitées dans l'étude que nous voulons mener. Il s'agit des intrusions d'animaux et de corps étrangers, qui conduisent souvent à un court-circuit, un phénomène instantané difficilement prévisible par le suivi d'une grandeur physique, encore moins de la température.

Outre le mauvais raccordement qui conduit à un échauffement local des connexions, nous constatons que la plupart des causes de défaillances se manifestent aussi par un échauffement local ou global du tableau électrique. Ainsi ce constat justifie l'idée de se servir de la température comme paramètre principal de suivi de l'état des tableaux électriques.

Le système d'aide à la maintenance préventive par la détection précoce et le diagnostic des défauts du tableau électrique que nous voulons mettre en place, se basera sur le système d'acquisition de données déjà existant dans la division des Services de Schneider-Electric. Ce système comprend les capteurs de température sans fil et les éléments communicants de mesure du courant. Nous considérons dans notre étude que ces données sont disponibles car rapatriées sur un serveur pour le traitement. Dans la suite de ce document nous nous concentrerons plutôt sur l'exploitation de ces données dans le but d'aider à la maintenance prédictive.

La mise en œuvre de cet outil de surveillance thermique implique :

- la compréhension des phénomènes de dégradation (Chapitre 2),
- un bon positionnement des capteurs (Chapitre 3),
- l'analyse des données issues des capteurs pour en dégager des informations utiles à la détection prédictive et au diagnostic (Chapitres 4 et 5).

## Chapitre2

# LE CONTACT ELECTRIQUE ET LES ESSAIS DE MISE EN EVIDENCE DES PHENOMENES LIES A SA DEGRADATION

---



# **LE CONTACT ELECTRIQUE ET LES ESSAIS DE MISE EN EVIDENCE DES PHENOMENES LIES A SA DEGRADATION**

## Introduction

Nous nous intéressons aux contacts électriques, compte tenu du fait qu'ils représentent, selon notre enquête, la partie du tableau la plus susceptible d'être à l'origine d'un défaut. Ainsi dans cette partie, nous présenterons, d'abord, dans un cadre théorique, ce qu'est un contact électrique, avec les principaux paramètres qui le caractérisent. Ensuite, nous nous attarderons sur une série d'essais réalisés pour comprendre les phénomènes de dégradation de ces contacts électriques.

# I. Généralités sur le contact électrique

Les contacts électriques permettent de lier électriquement deux éléments conducteurs. Ces éléments peuvent être des jeux de barres, des câbles ou des appareillages. Un contact électrique dans sa forme la plus simple est la mise en contact de deux surfaces métalliques conductrices de courant électrique.

Lorsqu'on met en contact deux surfaces métalliques, le contact entre ces deux surfaces n'est jamais parfait. C'est-à-dire que l'interface du contact n'est pas une zone lisse constituée d'un nombre infini de points, où tous les points en regard se toucheraient. En réalité la surface à l'interface d'un contact est constituée d'un nombre fini de points de contacts appelés « contacts élémentaires » (Figure 8). Le nombre et la taille des contacts élémentaires sont fonction de nombreux paramètres dont les plus significatifs sont :

- la dureté du matériau,
- la force de pression au contact,
- la planéité de la surface de contact.

Des impuretés comme la poussière, les copeaux de tous genres, peuvent s'insérer à l'interface du contact, et sont de nature à créer une discontinuité à l'interface du contact. Cette discontinuité est non seulement, à l'origine d'une résistance supplémentaire au passage du courant (résistance électrique) [7]-[8]-[9] mais aussi d'une résistance au passage du flux thermique (résistance thermique) [10]-[11]. L'annexe 1 donne une explication détaillée sur ces différentes résistances.

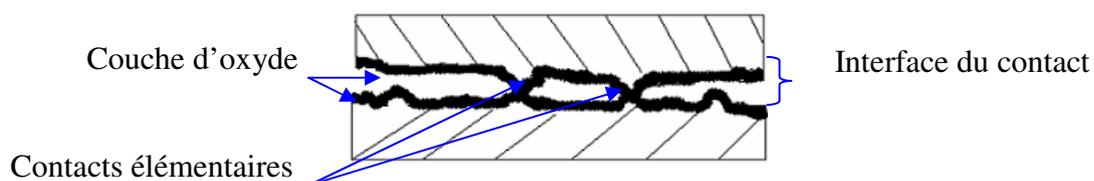


Figure 8 : Apparence réelle de l'interface d'un contact électrique agrandi au microscope.

# 1. Les contacts dans le tableau électrique

Pour répondre aux contraintes liées à l'architecture, l'accessibilité ou la facilité du montage et du démontage, plusieurs technologies de contacts électriques sont utilisées dans les tableaux électriques. Nous nous bornerons à en citer quelques unes représentatives des grandes familles de technologies.

Les plus utilisés sont les connexions de type boulonné, c'est-à-dire le contact « boulonné à plat », le contact « boulonné pincé » et le contact « sur chant » (Figure 9).

Le contact boulonné pincé se distingue du boulonné à plat par le fait qu'il se fait sans taraudage des deux jeux de barres à lier. Le contact sur chant, beaucoup plus complexe, sert à créer une dérivation entre un jeu de barres horizontal à un jeu de barres vertical.

Il existe une autre technologie de contact : Les pinces d'embrochage visible sur la Figure 9. Les pinces d'embrochage sont des connexions sans boulonnage qui sont réalisées à partir de la force d'appui des pinces. Ce type de connexion permet aux appareillages et aux unités fonctionnelles d'être débrosés du réseau et remplacés le plus rapidement possible pour des opérations de maintenance par exemple.

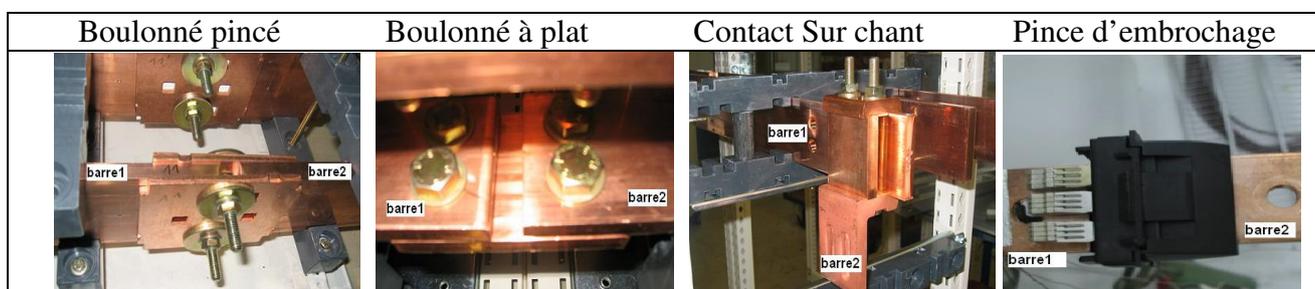


Figure 9 : Différentes technologies de contacts utilisés dans les tableaux électriques

## 2. Utilisation des formules de résistances de contacts dans le cas réel

Les formules pour évaluer les résistances de contact (évoquées dans l'annexe 1), relèvent encore du domaine théorique. Même si elles ont l'avantage de nous éclairer sur l'influence relative des différents paramètres physiques intervenant dans le calcul des résistances de contact, elles ne sont

que difficilement applicables dans la réalité. En effet, comme nous venons de le voir dans la section précédente, les formes des contacts sont souvent très complexes (Figure 9). La difficulté d'application de ces formules réside surtout dans l'évaluation par le calcul de la surface effective de contact [12]-[13].

Etant dans l'incapacité de prédire avec précision la valeur des différentes résistances de contacts (thermiques et électriques) à l'aide de formules, nous procédons dans le paragraphe II à des essais pour évaluer, de manière macroscopique, l'influence des dégradations sur des contacts.

## **II. Les essais de mise en évidence des phénomènes physiques liés à la dégradation des contacts**

Dans ce paragraphe nous présentons des essais ayant été réalisés pour mettre en évidence les effets des défauts des contacts électriques.

Quatre types d'essais ont été réalisés, il s'agit de :

- L'essai de mise en évidence du phénomène de bouchon thermique sur les pinces d'embrochage.
- L'essai de desserrage progressif sur les contacts « boulonnés à plat », « boulonnés pincés », et « boulonnés sur chant ».
- L'essai de vieillissement accéléré sur les contacts « boulonnés pincés ».
- L'essai de mesure de vibrations sur un contact « boulonné à plat ».

### **1. Essai de mise en évidence du bouchon thermique**

#### **1.1. Le but de l'essai**

Dans certaines conditions, le flux thermique véhiculé à travers un contact peut trouver des difficultés à circuler normalement, provoquant ainsi une augmentation de la différence de température de part et d'autre du contact. De même qu'un rétrécissement de la section locale sur un

tuyau d'écoulement peut causer une perte de charge (différence de pression), la pression étant analogue à la température et le flux thermique analogue au débit. Le blocage du flux thermique est le fait de la résistance thermique de contact qui est élevée. Nous imaginons que ce phénomène peut se produire dans le cas de contact mal dimensionné ou ayant vieilli par exemple.

Le but de cette expérience est donc de :

- Mettre en évidence le phénomène de bouchon thermique sur les pinces d'embrochages et le contact boulonné à plat.
- Etudier la résistance thermique de contact indépendamment de la résistance électrique, pour les pinces d'embrochage et les contacts boulonnés à plat.

## 1.2. Le déroulement de l'essai



Figure 10 : Banc d'essai de mise en évidence du bouchon thermique

L'expérience consiste à mettre une moitié de barre dans un four (repérée 1 sur la Figure 10) et l'autre moitié à l'extérieur (repérée 2 sur la Figure 10). Ces deux moitiés de barre sont reliées par un contact qui sera soit une pince d'embrochage ou un contact boulonné à plat. La suite de l'expérience consiste donc à imposer une température de l'air dans le four et à mesurer l'écart de température de part et d'autre du contact. L'expérience a été réalisée successivement avec à l'extérieur du four une barre longue de 40 cm puis une barre courte de 11 cm. En effet la barre longue est censée faire plus d'appel de flux de chaleur (Figure 11).

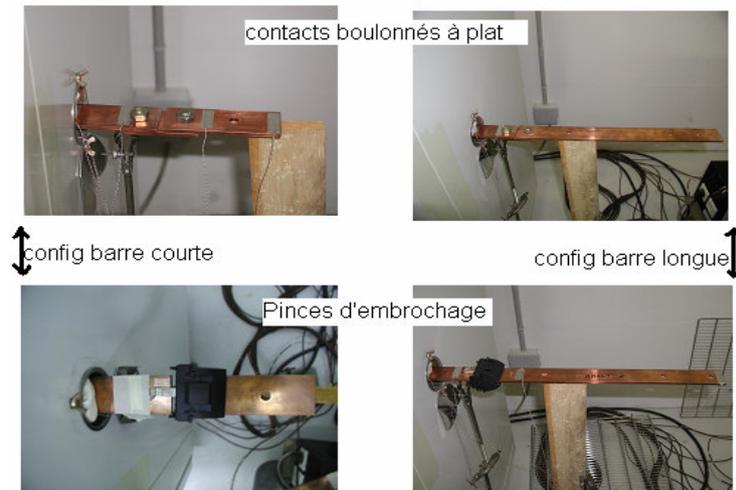


Figure 11 : Configuration barre courte et barre longue pour l'essai du bouchon thermique

Six cas de figures ont donc été testés :

- Pince d'embrochage avec 1 pince & barre extérieure longue.
- Pince d'embrochage avec 1 pince & barre extérieure courte.
- Pince d'embrochage avec 3 pinces & barre extérieure longue.
- Pince d'embrochage avec 3 pinces & barre extérieure courte.
- Contact boulonné à plat & barre extérieure longue.
- Contact boulonné à plat & barre extérieure courte.

### 1.3. Résultat de l'essai

Mise en évidence du phénomène de bouchon thermique.

Le phénomène de bouchon thermique est bien mis en évidence sur l'exemple avec une pince d'embrochage composée d'une seule pince. La température imposée dans le four est de 200°C.

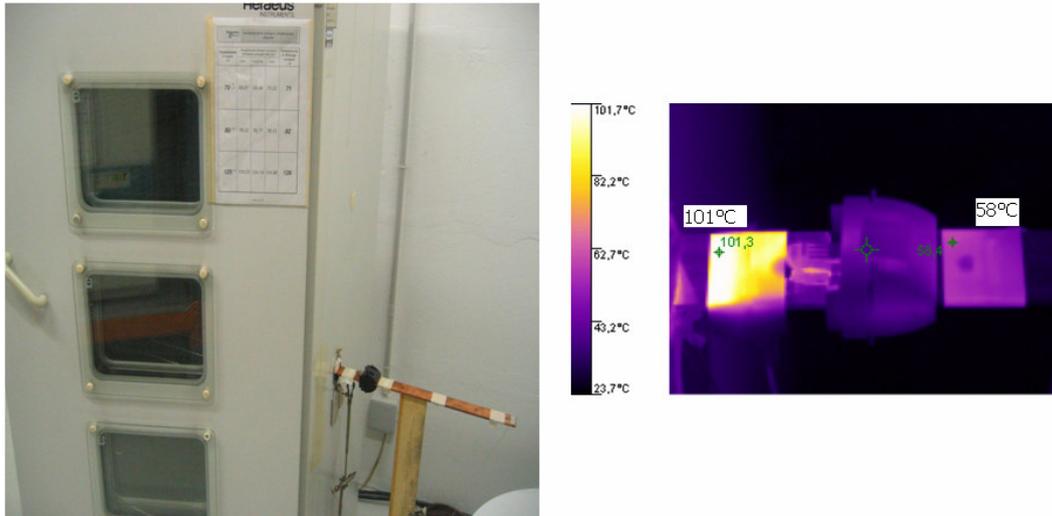


Figure 12 : Mise en évidence du bouchon thermique

Sur l'image thermographique de la Figure 12, nous remarquons une grande différence de température entre l'amont et l'aval du contact. En effet, en amont du contact nous avons 101°C tandis que juste en aval nous n'en avons plus que 58°C, soit environ 40°C d'écart. Cette différence serait seulement d'environ 10°C dans le cas d'un contact boulonné à plat dans les mêmes conditions d'essai. Ceci nous permet de bien mettre en évidence l'effet de la résistance thermique. Avec une pince d'embrochage composée d'une seule pince, le flux thermique a du mal à s'écouler. Il en résulte une température aval du contact très élevée et une température amont qui est beaucoup plus basse. Ce bouchon thermique contribue à creuser l'écart entre l'amont et l'aval du contact. D'une certaine manière ce phénomène rend le capteur de température qui serait placé en aval du contact aveugle à l'élévation de température anormale qui se passe en amont.

## Synthèse des résultats de l'essai.

Pour chaque configuration, nous imposons différentes températures dans le four et nous mesurons les températures de part et d'autre du contact. Deux types de comparaisons peuvent être faites :

- La comparaison de la différence de température selon la longueur de la barre extérieure (barre longue/barre courte).
- La comparaison de la différence de température selon le type de contact (boulonné, pinces d'embrochage avec 1 pince, pinces d'embrochage avec 3 pinces).

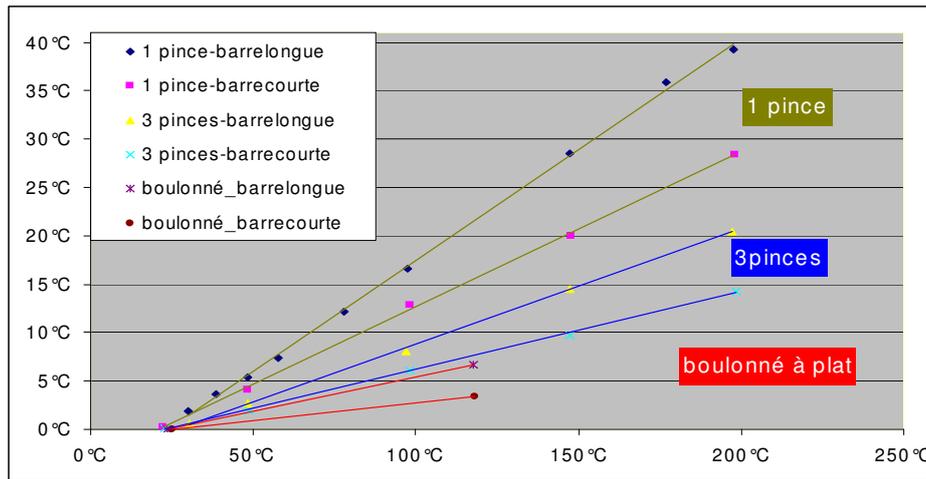


Figure 13 : Test de bouchon thermique sur les différents types de contacts et dans différentes configurations.

La Figure 13 présente plusieurs droites qui représentent la différence de température entre l'amont et l'aval du contact pour différentes températures imposées dans le four (en abscisse) et dans les différents cas de figures précités.

Ainsi ces courbes nous permettent de faire plusieurs remarques :

Remarque 1 :

La différence de température de part et d'autre du contact est une fonction linéaire de la température imposée dans le four. Cette différence de température est moins importante dans le cas du contact boulonné à plat. Selon les experts, ce contact quand il est serré au couple et bien dimensionné, peut être considéré comme la référence en terme de résistance thermique de contact vers laquelle les autres types de contacts devraient tendre.

Remarque 2 :

La différence de température dans le cas d'une barre longue est supérieure à celle avec une barre courte. En effet avec la barre longue il y a plus d'appel de flux. La résistance thermique a pour unité  $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ , ce qui signifie que : Plus il passe de flux thermique plus l'écart de température s'agrandit. Ainsi une résistance thermique de  $1^{\circ}\text{C}/\text{W}$  engendrerait une différence de température de  $1^{\circ}\text{C}$  s'il passe un flux thermique de  $1\text{W}$ . Comme avec la barre longue il passe plus de flux, la différence de température entre l'amont et l'aval du contact est plus élevée.

Remarque3 :

Cette expérience peut servir à estimer la résistance thermique de contact de sorte à avoir un ordre de grandeur de cette résistance. La méthode de calcul est basée sur la conservation du flux thermique de conduction. Elle nous donne une résistance thermique du contact boulonné environ 3 fois moins importante que celle de la pince d'embrochage composée de trois pinces (Cf. Annexe 2).

## **Conclusion de l'essai**

Dans la réalité, l'appareil qui est près d'une connexion impose un flux de chaleur et non une température comme nous l'avons fait dans cet essai. Toutefois il nous permet de faire des observations intéressantes. A travers cet essai nous avons pu faire les observations suivantes :

- Le bouchon thermique est bien mis en évidence avec une pince d'embrochage composée d'une seule pince. Il se caractérise par une différence de température très élevée entre l'amont et l'aval de la pince (+40°C).
- La différence de température entre l'amont et l'aval d'un contact est une fonction linéaire de la température imposée dans l'enceinte.
- Le bouchon thermique est d'autant plus mis en évidence que le jeu de barre aval est long ce qui occasionne plus d'appel de flux de chaleur.
- Le contact boulonné à plat a une résistance thermique faible par rapport à la pince d'embrochage et peut être considéré comme la référence en terme de résistance thermique, quand il est bien dimensionné et bien serré au couple.
- Cet essai nous donne une méthode de mesure de la résistance thermique à condition que le système soit adiabatique ce qui n'est rigoureusement pas le cas dans l'expérience présentée ci-dessus (Cf. Annexe3).

## **2. Essai de desserrage progressif**

### **2.1. Le but**

Nous savons que le desserrement d'un contact entraîne une élévation de sa résistance de contact, ce qui a pour effet un échauffement supplémentaire au passage du courant. L'essai de desserrage permet de se rendre compte de ce phénomène. Il répond à deux objectifs qui sont :

- Avoir l'ordre de grandeur de l'échauffement résultant du desserrage d'une connexion selon le niveau de desserrage de cette connexion.

- Avoir une idée de la distance à partir de laquelle l'échauffement dû à un desserrage est visible.

## 2.2. Le déroulement de l'essai : Exemple du contact pincé

Cet essai consiste à faire passer dans deux bouts de jeu de barre en cuivre liés par une connexion, environ le courant nominal. Après la stabilisation en température on effectue des desserrages progressifs. Par exemple dans le cas du contact boulonné pincé, ces desserrages ont eu lieu à la moitié, au quart, au huitième du couple nominal puis à la main. Des thermocouples placés tout au long des barres et sur le contact permettent de faire la mesure de la température. La température ambiante de la pièce est aussi mesurée de façon à pouvoir calculer l'échauffement. La Figure 14 donne la description de l'essai relatif au contact boulonné pincé.

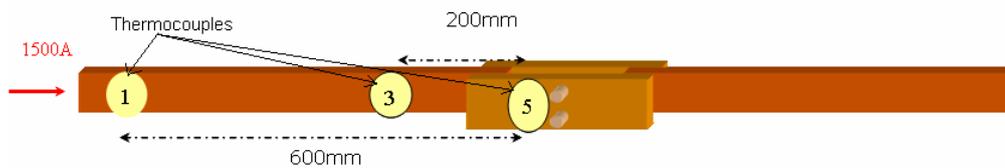


Figure 14 : Essai de desserrage progressif : exemple du contact boulonné pincé.

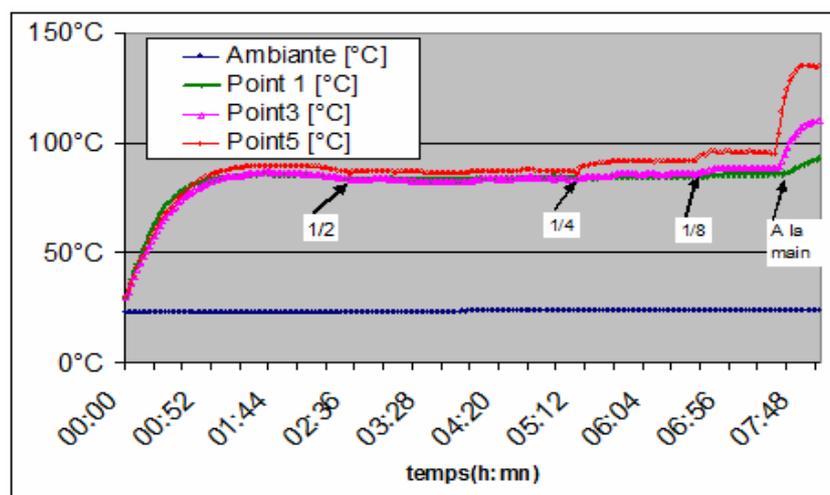


Figure 15 : Résultats de l'essai de desserrage progressif relatif au contact boulonné pincé.

Les courbes de la Figure 15 donnent l'évolution de la température au fil des desserrages sur les différents points de mesures. Plusieurs remarques peuvent être faites :

Remarque1 :

Nous remarquons sur la Figure 15 que l'échauffement est de moins en moins visible quand on s'éloigne du point chaud. Cela s'explique par les déperditions thermiques. Ainsi au fil des desserrages, l'échauffement au point 1 qui est à 60 cm du point chaud n'évolue presque pas.

Remarque2 :

Nous nous rendons compte qu'il faut desserrer beaucoup ( $< 1/8^{\text{ième}}$  du couple nominal) pour voir un échauffement notable au niveau de la connexion (point5 sur la Figure 14).

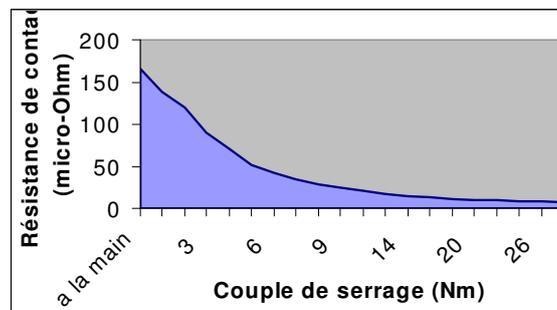


Figure 16 : Courbe de la résistance de contact en fonction du couple de serrage

Cela s'explique par l'évolution de la résistance électrique de contact en fonction du couple de serrage (Figure 16). Nous remarquons sur la courbe de la Figure 16 que la résistance de contact ne varie pas énormément lors du desserrage, jusqu'aux alentours de 7Nm (1/4 du couple nominal) à partir duquel elle augmente exponentiellement. D'où un échauffement qui est peu visible jusqu'à 1/4 du couple nominal, et beaucoup plus visible à partir de  $1/8^{\text{ième}}$  du couple nominal.

## 2.3. Synthèse des résultats de l'essai de desserrage

Outre le contact boulonné pincé, l'essai de desserrage a été réalisé sur les contacts « boulonné sur chant » et « boulonné à plat », dans les mêmes conditions que celles décrites pour le contact « boulonné pincé ».

Le Tableau 1 donne la synthèse des résultats de cet essai. Pour plus de détails sur les courbes d'échauffement, voir l'annexe 3. A la lumière de ce tableau, plusieurs remarques peuvent être faites.

	Pincé	A plat	Sur chant
Couple nominal (Cn)	28Nm	50Nm	28Nm
Jdb	80*10	60*10	60*10
Courant	1800A	1500A	1500A
Constante de temps	45mn	40mn	42mn
Temps de stabilisation	2h	2h	2h
Echauffement à 1/4 Cn	4 °C	3 °C	12 °C
Echauffement sensible à partir de	1/8 de Cn	1/8 de Cn	1/4 de Cn
Atténuation à 20cm	47%	53%	55%

Tableau 1 : Synthèse des résultats de l'essai de desserrage sur les trois technologies de contacts boulonnés

#### Remarque 1 : Echauffement au fil des desserrages

En ce qui concerne le contact « boulonné à plat », nous obtenons un résultat très proche de celui du « boulonné pincé ». L'échauffement à 1/4 du couple nominal est de +4 °C pour le pincé et +3°C pour le boulonné à plat. Le « sur chant » se démarque quelque peu de ces deux contacts par une grande résistance de contact donc engendre plus d'échauffement. Ainsi l'échauffement à 1/4 du couple nominal est de 12°C pour le « sur chant ».

#### Remarque 2 : Atténuation de l'échauffement sur la longueur de la barre :

Pour les trois technologies de contacts boulonnés, on calcule le pourcentage d'atténuation de la température stabilisée. Cette atténuation est calculée par rapport à la référence qui est le thermocouple sur la connexion (point 5 de la Figure 14). A 20 cm du point chaud, nous avons en moyenne 52% d'atténuation. Ainsi à cette distance du point chaud nous ne voyons plus que la moitié de l'échauffement généré au point chaud. A 60 cm, loin du point chaud, l'échauffement ne se voit pratiquement plus.

#### Remarque 3 : Dynamique du profil de température

Le temps de stabilisation est en moyenne de deux heures pour une consigne autour du courant nominal. La constante de temps est en moyenne de 43 mn. Elle dépend de plusieurs paramètres dont les paramètres physiques du matériau du jeu de barre et le courant. En effet elle est inversement proportionnelle au carré du courant [14]. Cette expérience nous permet surtout de nous rendre

compte que la montée de température après un desserrage est un phénomène de l'ordre de quelques minutes.

## Conclusion de l'essai

Nous pouvons tirer un certain nombre de conclusions à travers les observations faites durant cet essai :

- Au-delà de 20cm le défaut est difficilement visible. A 20cm du point chaud nous avons en moyenne 52% d'atténuation de l'échauffement supplémentaire généré.
- D'une manière générale, l'échauffement au point de contact est significatif à partir d'un couple de serrage très faible ( $< 1/8^{\text{ième}}$  du couple nominal).
- Le desserrage ne conduit pas rapidement à un processus d'emballement thermique, processus selon lequel le contact dans sa dégradation conduit à une augmentation de sa température qui elle-même contribue à dégrader encore plus le contact.

## 3. Essai de vieillissement accéléré

### 3.1. Le but

Dans l'expérience de desserrage progressif, nous nous rendons compte que le desserrage progressif se traduit par un échauffement supplémentaire mais ne provoque pas immédiatement un emballement thermique. Dans la littérature nous pouvons lire que le desserrage favorise les micros déplacements qui accélèrent le processus de vieillissement par oxydation et corrosion des contacts élémentaires [15]. Pour un contact rigide (serré au couple), il faudrait des dizaines d'années pour voir une dégradation significative.

Ainsi, cet essai de vieillissement accéléré poursuit deux objectifs :

- Visualiser le vieillissement à travers l'échauffement du contact.
- Voir l'influence du courant et les vibrations résultantes sur le vieillissement.

### 3.2. Déroulement de l'essai

Il s'agit de faire subir à un jeu de barre aboutissant à un contact « boulonné pincé » plusieurs cycles de courants (Figure 17).

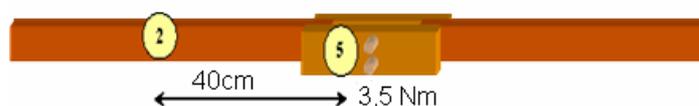


Figure 17 : Essai de vieillissement : exemple du contact boulonné pincé.

Le cycle étant décrit comme suit : Le jeu de barre est alimenté en courant pendant 2 heures, le temps de la stabilisation. Entre deux cycles, le courant est coupé pour laisser refroidir le jeu de barre jusqu'à sa stabilisation à la température ambiante. Ce refroidissement dure aussi environ deux heures.

Le contact pincé mis à l'essai a été préalablement desserré à  $1/8^{\text{ième}}$  de son couple nominal soit 3,5 Nm, dans le but d'accélérer le vieillissement. L'essai a eu lieu en deux temps :

- Dans un premier temps nous faisons passer un courant de 1800 A (1,2 In). Cette première phase dure 12 cycles.
- Dans un deuxième temps, nous faisons passer un courant de 2200A (1,5In). Cette phase dure du cycle 13 au cycle 32.

Nous surveillons la différence de température entre le point 2 et le point 5. Les résultats sont présentés ci-dessous.

### 3.3. Résultat de l'essai

La courbe de la Figure18 nous montre que le nombre de cycles affecte le contact. Celui-ci vieillit dans le temps. Ce vieillissement se manifeste par un échauffement local qui augmente au fil des cycles.

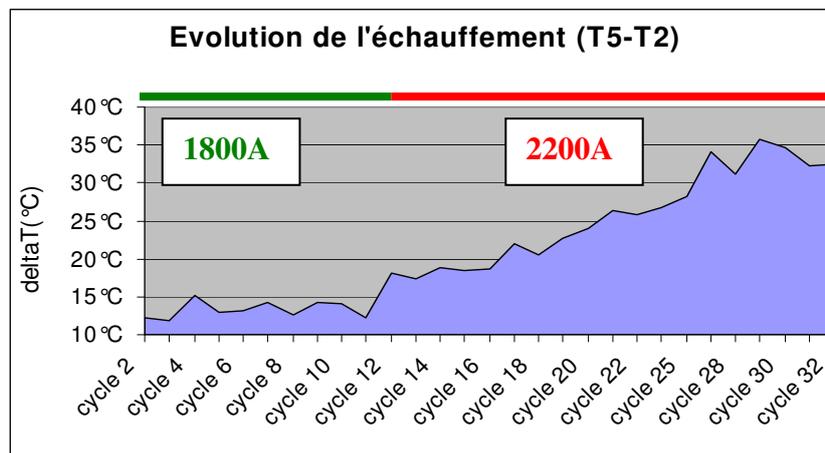


Figure18 : Evolution de la température en fonction du nombre de cycle de vieillissement.

Nous distinguons deux parties dans cette courbe :

- La première partie, relativement plate, du cycle 1 au cycle 12, se fait sans augmentation notable de l'échauffement. Autrement dit le contact n'a presque pas vieilli durant ces cycles. En effet le courant d'alimentation était de 1800 A, soit 1,2 fois le courant nominal.
- Du cycle 12 au cycle 32 nous notons une augmentation notable de l'échauffement, le contact a donc vieilli. Ces cycles correspondent à un courant d'alimentation plus important à savoir 2200A soit un peu moins de 1,5 fois le courant nominal.

## Conclusion de l'essai

Nous constatons à travers cet essai que :

- Le contact électrique vieillit dans le temps.
- Le vieillissement est accéléré par les surcharges.

En effet plusieurs phénomènes en relation avec les surcharges peuvent expliquer ce vieillissement accéléré :

La surcharge entraîne une élévation de température locale qui conduit, selon la loi d'Arrhenius [15] à une accélération des réactions chimiques de corrosion et d'oxydation qui rongent les contacts.

Ce vieillissement peut s'expliquer aussi par les possibles phénomènes de relaxation du jeu de barre qui subit des variations de températures. La variation des dimensions qui s'en suit provoque une diminution de la force de pression au fil des cycles et donc une augmentation de la résistance de contact. Les vibrations dues au courant alternatif (50 Hz), dont l'amplitude augmente avec le niveau du courant, sont de nature à accélérer les micros déplacements. Ces micros déplacements peuvent entraîner une diminution de la force de pression, ou bien créer une autre distribution des points de contacts élémentaires qui irait dans le sens de la diminution de la surface effective de contact et donc entraînerait l'augmentation des résistances de contact.

## 4. Essai vibratoire

### 4.1. Le but

Le but de cet essai est d'analyser dans quelle mesure le desserrage d'un contact modifie son mode vibratoire.

## 4.2. Déroulement de l'essai

Le banc d'essai est une armoire électrique type « OKKEN » de Schneider-Electric. Le test consiste à mesurer le signal vibratoire (accélération) d'une connexion de l'armoire.

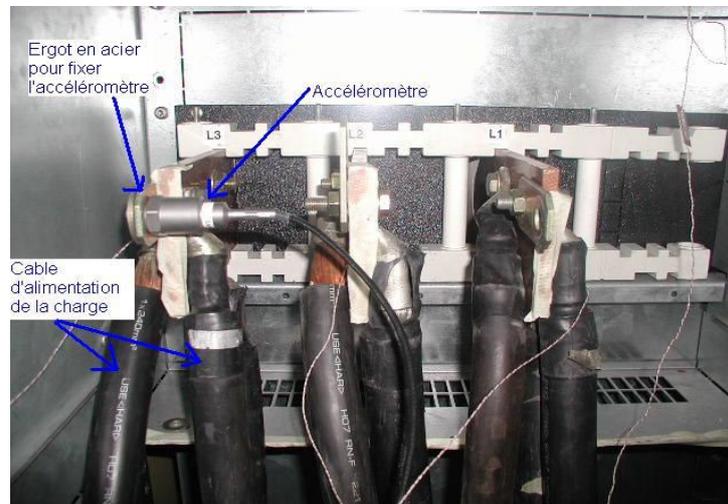


Figure 19 : Mesures vibratoires sur un contact boulonné dans un tableau électrique.

La connexion choisie relie un jeu de barre du tableau à un câble destiné à alimenter une charge externe. Ce type de connexion est appelé connexion client car il relie généralement l'armoire à l'application client. L'accéléromètre est placé sur la connexion dont on mesure la vibration (Figure 19). L'armoire est alimentée en courant alternatif de 1200A. L'accéléromètre est fixé sur un ergot en acier comme le montre la Figure 19. L'essai consiste à faire des desserrages à 1/2, 1/4, 1/8 puis 1/16 du couple nominal qui est de 50 Nm. A chaque desserrage nous enregistrons une séquence de quelques minutes du signal vibratoire. La fréquence d'échantillonnage est de 250 Hz. Elle a été choisie pour pouvoir suivre la raie de 100Hz. En effet les vibrations dans l'armoire électrique ont pour origine les forces de Laplace exercées sur les conducteurs à chaque alternance. Cette force fait intervenir le produit des courants déphasés et de même fréquence. Ainsi si nous prenons deux jeux de barres parcourues respectivement par des courants  $i_1 = Cte_1 \cdot \sin(\omega t)$  et  $i_2 = Cte_2 \cdot \sin(\omega t + \alpha)$ , alors la force  $F$  de Laplace résultant de l'interaction entre ces deux courants sera de la forme :  $F = Cte \cdot \sin(2\omega t + \alpha)$ . Par conséquent, sachant que le courant pulse à 50Hz, les vibrations résultantes ont une fréquence double, c'est-à-dire 100Hz.

## 4.3. Résultats de l'essai

### Analyse temporelle

A la lecture du signal temporel, nous pouvons conclure que l'amplitude du signal vibratoire est d'autant plus élevée que le couple de serrage est bas. Toutefois, si la différence d'amplitude est très nette entre le signal associé au « serrage au couple nominal ( $C_n$ ) » et celui associé au « serrage à  $1/8$  ième du couple nominal », elle ne l'est pas toujours pour les autres couples de serrages. Ainsi le passage de  $C_n/8$  à  $C_n/16$  ne se voit pratiquement pas sur l'amplitude des vibrations associées à ces cas.

### Analyse fréquentielle

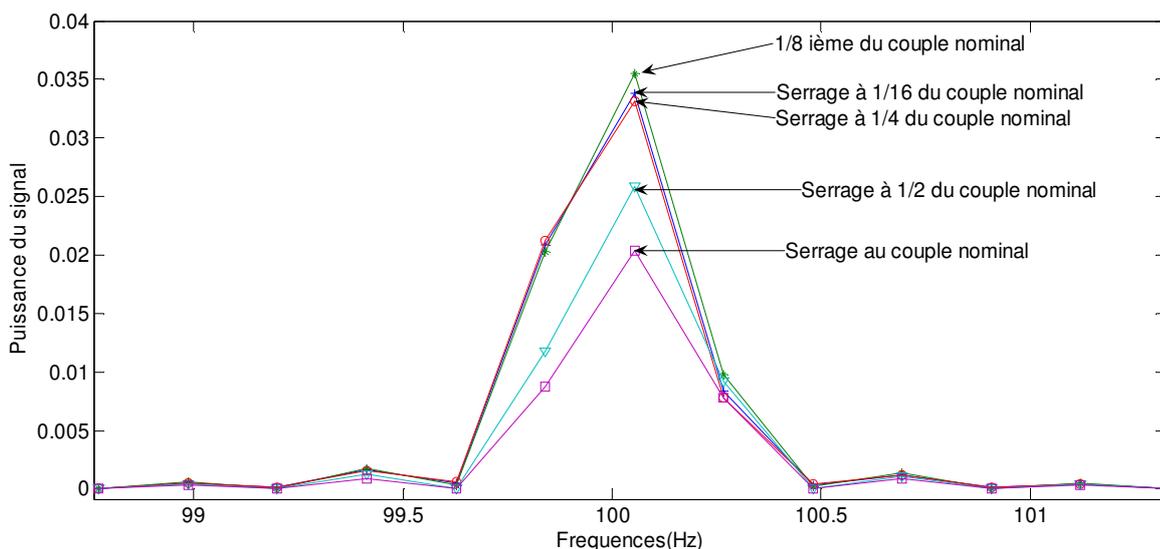


Figure 20 : Amplitude de la raie 100hz selon le niveau de desserrage.

En règle générale, l'amplitude de la raie 100Hz croît avec la dégradation du contact (desserrage), la différence est nette entre un contact serré au couple et un contact totalement dégradé (serré à  $C_n/8$ ) mais on peut arriver à des contradictions car l'amplitude du  $C_n/8$  est plus élevée que celle du  $C_n/16$  (Figure 20).

Une comparaison en valeur relative (par rapport à leur valeur au couple nominal) de la vibration et de l'échauffement est donnée à la Figure 21 pour différents couples de serrage. Nous pouvons constater que pour les petits desserrages jusqu'à  $1/8$  ième du couple de serrage la variation relative de

l'amplitude des vibrations est plus importante que celle des échauffements mais la tendance s'inverse à partir de  $1/8^{\text{ième}}$  du couple nominal.

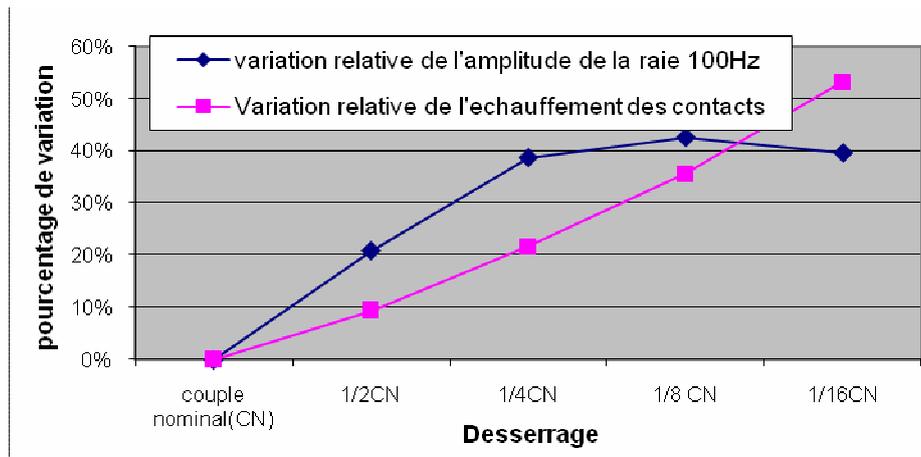


Figure 21 : Comparaison de la variation relative d'amplitude de la température et celle de la vibration.

## Conclusion de l'essai

L'essai de mesure de la vibration nous montre que :

Quel que soit le type d'analyse qui est faite (temporelle ou fréquentielle), un contact très dégradé se distingue nettement d'un contact serré au couple par une amplitude des vibrations (pour l'analyse temporelle) ou une amplitude de la raie de 100Hz (pour l'analyse fréquentielle) plus élevée. Cependant nous remarquons que cette différence n'est pas très marquée pour des desserrages intermédiaires. Nous arrivons même à avoir une amplitude de la raie de 100Hz correspondante au desserrage au  $1/16^{\text{ième}}$  du couple nominal qui est inférieure à celle correspondante au  $1/8^{\text{ième}}$  du couple nominal. Ceci rend difficile l'interprétation du signal vibratoire en tant que moyen de détecter et surtout d'évaluer le desserrage d'un contact électrique.

Dans ce travail de thèse nous avons travaillé, surtout à la détection du desserrage par la mesure de la température. Cependant, les résultats de cet essai ouvrent la voie à une possible complémentarité entre la vibration et l'échauffement, pour la détection et l'évaluation du desserrage. La première pouvant permettre de détecter les petits desserrages et la seconde les desserrages plus importants. C'est le même principe que dans la coupure électrique, le courant est utilisé pour la coupure rapide et la température pour la coupure lente.

# CONCLUSION

Une vision théorique du contact électrique a été présentée dans cette partie. Cette vision met l'accent sur deux paramètres influents dans l'échauffement du contact et permettant d'expliquer sa dégradation. Ce sont : la résistance électrique de contact et la résistance thermique de contact.

Les observations faites au cours des expériences montrent bien que le desserrage du contact électrique conduit à une augmentation de la résistance de contact qui s'échauffe par effet Joule au passage du courant. Cependant, en général, il faut desserrer le contact à un couple inférieur au huitième de son couple nominal pour voir un échauffement significatif. Par ailleurs, l'échauffement résultant reste un phénomène local.

L'essai de vieillissement du « contact boulonné pincé » prouve que le contact vieillit dans le temps. Il vieillit d'autant plus qu'il subit des surcharges, qui sont à l'origine de fortes vibrations et de phénomènes de relaxations qui diminuent la force de pression et augmentent ainsi la résistance de contact [16]. Par ailleurs, la mesure de la vibration comme moyen de détecter un desserrage se heurte à des difficultés d'interprétations.

Une forte résistance thermique empêche le flux de chaleur de circuler à travers le contact. Ce phénomène mis en évidence dans l'essai de bouchon thermique entraîne une élévation anormale de la température en amont du contact.

Il est important de souligner que toutes ces expériences permettent de se rendre compte qu'un contact électrique défaillant qui est laissé sans intervention ne retrouve pas son état normal. Au contraire il peut se dégrader encore plus sous certaines conditions de vieillissement accéléré (surcharges par exemples).

Ainsi, les essais réalisés pour comprendre les phénomènes physiques liés aux dégradations des contacts électriques nous ont donné un certain nombre de résultats nous permettant d'aborder la phase de pose des capteurs.

## Chapitre3

# LA THERMIQUE DANS LE TABLEAU ELECTRIQUE ET LE POSITIONNEMENT DES CAPTEURS DE TEMPERATURE

---



# **LA THERMIQUE DANS LE TABLEAU ELECTRIQUE ET LE POSITIONNEMENT DES CAPTEURS DE TEMPERATURE**

## **Introduction**

Un bon emplacement des capteurs est une condition nécessaire pour espérer une détection précoce des défaillances du tableau électrique. Avant d'aborder la pose de capteur proprement dite, il nous semble important de rappeler les conditions d'échanges thermiques dans le tableau électrique.

# I. La thermique dans l'armoire électrique

Du point de vue de la thermique, l'armoire électrique est un système constitué d'un fluide, l'air, et de plusieurs éléments solides actifs ou inactifs. Les éléments inactifs sont les cloisons, l'enveloppe et toutes les parties dans lesquelles, normalement il ne circule pas de courant électrique. Les éléments actifs sont les jeux de barres, les câbles, les disjoncteurs et autres appareils dans lesquels circule le courant électrique. Ces éléments actifs sont reliés par des connexions qui tout comme ces derniers sont de véritables sources de chaleur (surtout quand elles se desserrent).

Au passage du courant électrique, la température des éléments actifs s'élève par effet Joule entraînant ainsi un déséquilibre de l'état thermique. Pour atteindre l'équilibre thermique, toutes les parties y compris l'air, échangent thermiquement selon les trois phénomènes classiques d'échanges thermiques que sont : la conduction, la convection, le rayonnement, dont la théorie est rappelée en annexe (Cf. annexe 4). Tous ces phénomènes d'échanges thermiques se retrouvent au sein de l'armoire électrique. La Figure 22 nous donne une vision synthétique des constituants du tableau électrique et des différents échanges thermiques qui se passent entre ces éléments.

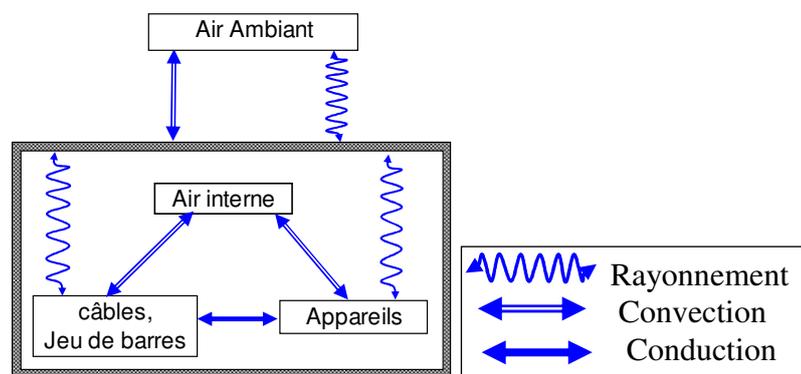


Figure 22 : Echanges thermiques au niveau d'une armoire électrique.

## 1. La conduction dans l'armoire électrique

La conduction dans le tableau électrique est réalisée au sein des conducteurs, des câbles et des jeux de barres qui sont aussi des sources d'énergie. Il s'agit donc d'une conduction vive. Au niveau des appareils, la chaleur créée par effet joule est évacuée par conduction vers les jeux de barres et les câbles à travers les contacts électriques. Selon les experts, la conduction est le phénomène d'échange thermique prépondérant au sein de l'armoire électrique. Elle représente 60 à 70% des échanges thermiques dans le tableau.

## 2. La convection dans l'armoire électrique

L'air interne de l'armoire électrique échange par convection avec les surfaces des constituants solides de l'armoire électrique que sont les appareils, les conducteurs et les différentes parois (enveloppes et cloisons). Il faut aussi noter qu'un transport de la chaleur est fait du bas du tableau vers le haut par les mouvements convectifs de l'air interne. Ainsi il peut arriver que l'air du haut de l'armoire électrique soit plus chaud de plus de 20°C par rapport à l'air du bas de l'armoire électrique.

## 3. Le rayonnement dans l'armoire électrique

Dans l'armoire électrique, la chaleur est échangée par rayonnement, entre les jeux de barres des différentes phases, entre les jeux de barres et les différentes parois des cloisons ou de l'enveloppe. La chaleur apparaissant par effet joule au niveau des appareils est aussi échangée par rayonnement avec les parois de l'enveloppe et les surfaces des autres appareils les plus proches.

Toutefois au niveau du tableau électrique ce mode d'échange thermique reste moins important que la conduction et la convection.

# II. Le positionnement des capteurs de températures dans l'armoire électrique

Compte tenu des essais et études qui ont fait l'objet des paragraphes précédents, un certain nombre de résultats et remarques peuvent nous guider dans l'emplacement des capteurs. Ce sont principalement les suivants :

- La première cause de défaut des tableaux électriques est la dégradation des contacts électriques, qui se manifeste par un échauffement. Cet échauffement est localisé.
- Dans certaines conditions, le phénomène de bouchon thermique peut empêcher la circulation du flux thermique généré par un appareil, contribuant ainsi à chauffer encore plus l'appareil.
- La conduction est le phénomène d'échange prépondérant dans l'armoire électrique représentant 60 à 70% des échanges thermiques.

- Le mouvement convectif de l'air entraîne des températures dans la partie supérieure du tableau plus élevée que celles de la partie inférieure.

Le caractère local de l'échauffement résultant d'un défaut de contact électrique nous emmène à instrumenter au plus près du contact pour espérer voir le défaut le plus tôt. L'instrumentation de tous les contacts résoudrait évidemment le problème. Cependant, ceci n'est pas une solution viable dans le tableau électrique, compte tenu du nombre très important de contacts électriques.

Ainsi, nous présentons dans ce chapitre une matrice de priorité des points de l'armoire à instrumenter pour aider à placer les capteurs prioritairement dans les zones critiques.

Les critères de priorité sont dans l'ordre d'importance, « le contexte de raccordement », « la technologie de contact », et « la hauteur à laquelle se situe le contact ». Dans le paragraphe suivant, pour chacun de ces critères, nous donnons ses sous-éléments par ordre de criticité.

## **1. Les critères de priorité**

### **1.1. Critère 1 : Le contexte**

Le principal danger pour les connexions, n'est pas la température intrinsèque du point chaud, mais le fait que les isolants atteignent leur température limite ( $\leq 130^{\circ}\text{C}$ ), ce qui peut conduire à un défaut d'isolement et donc à un amorçage. Nous distinguons 4 contextes différents :

#### **Contexte 1 : Connexions à proximité de gros appareils.**

Les appareils sont le siège d'une création de chaleur. La défaillance de leurs connexions peut dans certains cas rendre difficile l'évacuation de la chaleur et ainsi contribuer à l'échauffement de l'appareillage. On observe un phénomène de bouchon thermique (Chapitre 2).

Il peut y avoir fusion des isolants, dégradation de l'isolement et même incendie provoqué par un amorçage. Pour prévenir ce cas, il serait plus judicieux de placer le capteur coté appareillage. Car comme nous pouvons le constater sur la photo thermique de la Figure 23, de gros écarts peuvent être observés entre l'amont et l'aval du contact. Cette photo, certes caricaturale (car le défaut a été amplifié en mettant 1 pince au lieu de trois dans le cas normal) nous montre bien ce qui pourrait se passer à une échelle plus réduite en cas de défaut au niveau de la pince (Pince installée de travers par exemple).

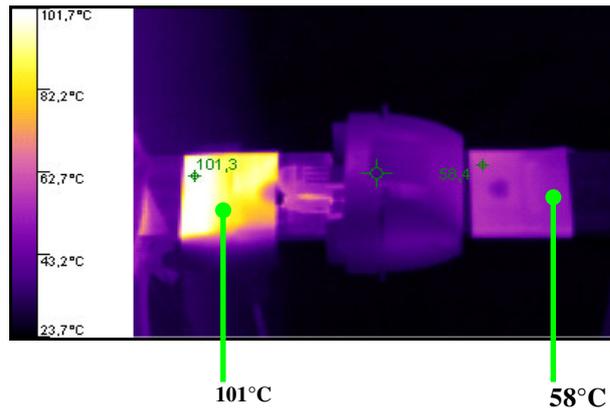


Figure 23 : Illustration du phénomène de bouchon thermique lors d'un essai.

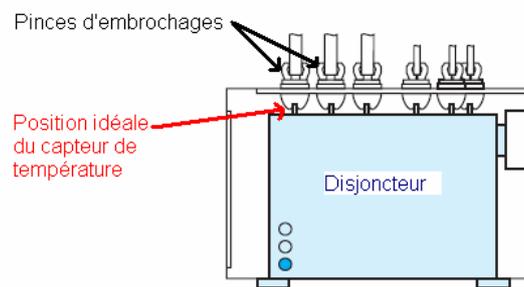


Figure 24 : Exemple de positionnement de capteur autour d'un appareillage débrochable.

## Contexte 2 : Les connexions des raccordements clients

Les expertises attestent que c'est dans la zone installateur et plus particulièrement celle des raccordements clients qu'il y a le plus de problèmes.

En effet les connexions clients sont susceptibles d'être manipulées par l'installateur en cas d'extension par exemple. C'est la partie la plus susceptible d'être soumise à des modifications, donc la plus susceptible de voir des défaillances dues aux fautes d'attention ou à la non-expertise de l'installateur (non respect du couple de serrage par exemple).

## Contexte 3 : Les connexions des jeux de barres isolées ou près des parties isolées

En cas de surchauffe de la barre, les isolants risquent de perdre leurs propriétés d'isolation, entraînant ainsi des défauts sur la tenue des distances d'isolement. En effet si par conception on isole les jeux de barres, on réduit par la même occasion les distances d'isolement. Ainsi un jeu de

barre isolée qui perd son isolant à la suite d'un défaut ne tiendrait certainement plus les distances d'isolement. L'exemple le plus frappant est celui des canalisations (Figure 25) où les barres sont presque accolées parce qu'elles sont isolées.

Il peut arriver qu'une limaille de métal vienne gratter l'isolant. La tenue diélectrique est rompue : il s'ensuit un court-circuit.

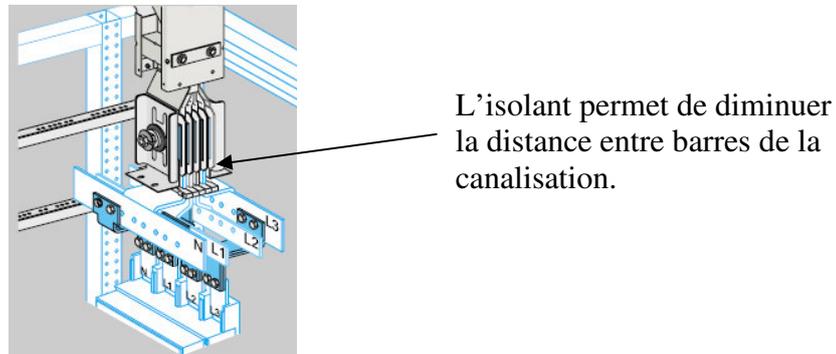


Figure 25 : Illustration de la diminution de la distance entre jeux de barres isolées.

#### Contexte 4 : Les connexions des jeux de barres nues loin d'isolants et loin des appareillages

Les connexions des jeux de barres nues loin d'isolants et loin des appareillages contribuent seulement à l'échauffement global de l'air autour du jeu de barre sans forcément être dangereux de prime abord. Car, comme nous le disions plus haut, le danger n'est pas tant la température absolue du jeu de barre mais l'atteinte des températures limites des isolants autour du jeu de barre. Cependant une élévation globale de la température du tableau peut être source de déclenchements intempestifs de l'appareillage. Le tableau de décroissance de l'échauffement du point chaud issu de l'expérience de desserrage progressif sur plusieurs technologies de contacts (chapitre 2) montre que le point chaud n'a pratiquement plus d'effet à 60 cm plus loin. Les jeux de barres nues peuvent être considérées comme étant loin de toute partie isolante si les barres ne rencontrent pas d'isolant dans leur voisinage jusqu'à 60 cm de distance.

Distance au point chaud (cm)	0	20	60
Décroissance de l'échauffement (%)	0	50	80

Tableau 2 : Tableau de décroissance de l'échauffement du point chaud issu de l'expérience sur plusieurs technologies de contacts.

## **1.2. Critère 2 : Technologie de raccordements**

Le bouchon thermique est plus susceptible de se produire avec la pince d'embrochage car nos expériences montrent que la résistance thermique des pinces est globalement plus élevée que celle des contacts boulonnés. D'autre part, les pinces servent à raccorder les unités fonctionnelles débrochables, d'où leur possible manipulation au cours de la durée de vie du produit, ce qui pourrait être une source potentielle de défaut.

Il est important de souligner qu'il n'y a pas de risque lorsque les raccordements se font dans les règles de l'art selon les guides Schneider-Electric. La pince a été dimensionnée en fonction de l'utilisation qui devrait en être faite. Les risques apparaissent seulement en cas de mauvaise utilisation entraînant la défaillance ou le vieillissement accéléré du contact (par exemple l'installateur met une pince au lieu de deux ou la pince est mise de travers...).

Dans le critère technologie de raccordement nous distinguons donc deux catégories :

### **Technologie 1 : Les Pinces d'embrochage**

Utilisées de plus en plus pour assurer la fonction de « débrochabilité » des unités fonctionnelles, elles sont susceptibles de se dégrader plus rapidement entraînant ainsi des risques de bouchon thermique.

### **Technologie 2 : Les Contacts de type Boulonné**

Les contacts de type boulonné sont moins sujets au phénomène de bouchon thermique.

## **1.3. Critère 3 : La Hauteur**

Nous pouvons observer dans un tableau faiblement cloisonné (c'est à dire qui facilite la convection naturelle), que le haut du tableau est en général plus chaud que le bas du tableau. La différence de température ambiante entre le haut du tableau et le bas peut alors atteindre 20°C. Ainsi un contact placé dans la zone haute du tableau subit un stress supplémentaire dû à sa position.

La hauteur nous semble donc être un critère pertinent à prendre en compte dans l'installation des capteurs. Nous pouvons subdiviser ce critère en 3 catégories (rangées de la plus contraignante à la moins contraignante) : « Emplacement Haut », « Emplacement Bas », « Emplacement Milieu rangé ».

## 2. Tableau des priorités dans la pose des capteurs

Les différents critères cités plus haut nous permettent de créer une matrice de priorités des zones à instrumenter, en rangeant les différents sous-critères par ordre de criticité. Ainsi chaque point de contacts électriques à instrumenter pourra être situé dans la matrice en fonction des trois critères que sont le contexte dans lequel le contact est installé, la technologie du contact, et son emplacement dans l'armoire électrique.

	<b>3-</b> Connexions près de gros appareillages		
	<b>2-</b> Connexions clients		<b>2-</b> Haut
	<b>1-</b> Connexions de barres isolées ou près de parties isolées.	<b>1-</b> Pince d'embrochage	<b>1-</b> Milieu
	<b>0-</b> Connexions barres non isolées et loin des parties isolées	<b>0-</b> Contact boulonné	<b>0-</b> Bas
	<b>Critère 1: Contexte</b>	<b>Critère 2: Technologie de contact</b>	<b>Critère 3: Position dans le tableau</b>
			

Figure 26 : Tableau des zones de priorités dans l'emplacement des capteurs de températures dans l'armoire électrique.

### Utilisation de la matrice de priorité :

Au plus petit nombre correspond le poids critique le plus bas. Donc la situation « 0.0.0 » est moins critique que la situation « 3.1.2 ». Autrement dit un contact qui assure la connexion d'une barre non isolée et loin de parties isolées, qui est de type boulonné et qui se situe au bas du tableau, est moins critique qu'une pince d'embrochage assurant la connexion d'un gros appareil et se situant dans la partie haute du tableau . Le capteur sera prioritairement posé sur cette dernière.

Cette matrice nous permet donc de classer les zones à instrumenter par ordre de criticité. Supposons que nous avons un nombre restreint de capteurs, nous pourrions utiliser cette matrice pour placer les capteurs uniquement dans les zones prioritaires.

Cette matrice d'aide au choix devrait être mise à jour avec le retour d'expérience. En effet le retour d'expérience devra permettre d'ajouter d'autres éléments à la matrice de manière à être plus précis dans cette classification.

### 3. Autres précautions à prendre dans la pose des capteurs

- Les capteurs devront être placés le plus près possible de la partie à surveiller. Ne pas placer le capteur à plus de 20cm de l'élément cible (à 20cm il y a environ 52% de déperdition).
- Mesurer la température de l'ambiante extérieure du tableau. Les constructeurs de tableaux électriques raisonnent souvent en échauffement par rapport à cette température. Par exemple les échauffements admissibles des constituants du tableau électrique donnés dans la norme IEC-60439.1 sont calculés à partir de l'ambiante extérieure.
- Mesurer la température de l'ambiante intérieure du tableau : Le vieillissement des composants du tableau et des contacts est accéléré avec l'augmentation de la température de l'ambiante intérieure du tableau. Cette donnée nous est donc nécessaire pour l'analyse de vieillissement des contacts qui fera l'objet du prochain chapitre.
- Pour les tableaux faiblement compartimentés, il faut mesurer au moins la température ambiante position haute, milieu et basse.
- Pour les tableaux fortement compartimentés (> forme 3: les appareils sont séparés entre eux) il faudrait mesurer l'ambiante de chaque niveau car la convection naturelle est fortement réduite par les cloisons (Figure 27).

Forme 3a  
Les unités fonctionnelles sont séparées entre elles et sont séparées des jeux de barres, pas les bornes.

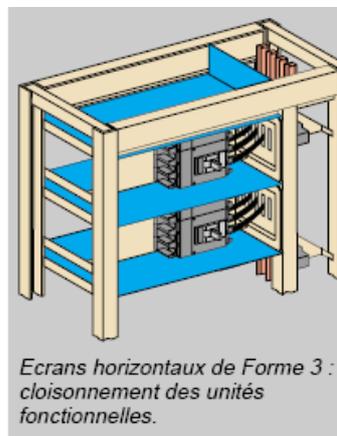
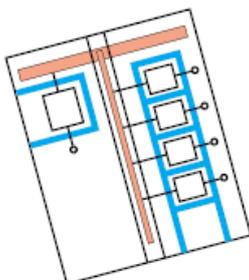


Figure 27 : Schéma d'un tableau de forme 3

- Placer systématiquement les capteurs sur chacune des trois phases. En effet, en cas de défaut sur la phase 1 s'il n'y a qu'un capteur sur la phase 2 on ne verra pas le défaut ou trop tard.

## **4. La question du nombre de capteurs**

En ce qui concerne le nombre de capteurs, son optimisation est rendue difficile par le fait que l'échauffement résultant d'un défaut de contact électrique est souvent très localisé, il faut donc aller au plus près du contact pour espérer voir le défaut.

Le nombre de capteurs dépend évidemment de la structure et de la taille du tableau électrique. Il est aussi lié au nombre de disjoncteurs et d'unités fonctionnelles du tableau car ce sont des zones à instrumenter prioritairement. A titre indicatif, un tableau électrique avec un disjoncteur triphasé d'arrivée et un disjoncteur triphasé de départ peut être instrumenté convenablement avec 15 capteurs. 2 capteurs d'ambiance intérieure près des disjoncteurs, 1 capteur d'ambiance extérieure, 3 capteurs pour chaque entrée et sortie des disjoncteurs. Sachant que le prix de revient du point de mesure est bien inférieur à 50 euros (hors main d'œuvre) alors le coût de l'instrumentation de ce tableau est sans comparaison devant les sommes énormes qui sont perdues quand une installation est mise à l'arrêt. Le coût de l'arrêt étant en grande partie lié à la production perdue et non au remplacement des matériels électriques défaillants.

# CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous nous sommes appuyés sur les expériences effectuées sur les contacts électriques, et les conditions de transferts thermiques dans le tableau électrique pour présenter une méthode de hiérarchisation des zones du tableau électrique à instrumenter en priorité. Le caractère local des échauffements dus aux dégradations des contacts impose de se placer le plus près possible (<20 cm) du contact à surveiller.

Une fois la pose du capteur effectuée, la prochaine étape est la détection du défaut en utilisant les données issues des capteurs. Ce sera l'objet du chapitre suivant.



## Chapitre4

# SYSTEME DE DETECTION

---



# SYSTEME DE DETECTION

## Introduction :

Dans les chapitres précédents, nous avons présenté les analyses qui ont conduit à une stratégie de positionnement des capteurs de températures. Ceci dans le but d'instrumenter les contacts électriques critiques pour pouvoir détecter tout échauffement anormal de ces derniers.

Dans le présent chapitre, nous nous intéressons à la mise en œuvre, à partir de ces mesures, du système de détection proprement dit. Le système proposé est basé sur la connaissance des températures et des courants circulant dans les différents circuits. Dans les applications basse tension, les mesures de courants sont faites à l'aide des transformateurs de courant intégrés aux appareillages communicants de Schneider-Electric. Ces données nous permettront de mettre en œuvre deux niveaux de détection.

Le niveau 1 : Le premier niveau n'utilise que les données de températures pour donner une indication sur l'état des contacts électriques. Ce niveau de détection simple à mettre en œuvre se fait sans modélisation du système. Il génère deux types d'indicateurs (Figure 28) :

- *L'indicateur de franchissement des seuils de température imposés par la norme.*
- *L'indicateur du taux de vieillissement des contacts électriques.*

Le niveau 2 : Le deuxième niveau de détection utilise la mesure des courants électriques en plus des températures pour donner une indication sur l'état des contacts électriques. Ce niveau d'analyse permet d'être beaucoup plus en amont dans la prédiction de la défaillance du contact, en mesurant l'adéquation entre le courant qui circule et les températures affichées. Cela nécessite une modélisation du comportement thermique du tableau électrique. Deux types de modèles ont été testés :

- *Un modèle physique*, donnant une image thermique du tableau en fonction du courant qui y circule et des températures ambiantes (Figure 28).
- *Un modèle purement mathématique*, basé sur la capacité des réseaux de neurones à généraliser la reconnaissance des cas de défaillances ayant fait au préalable l'objet d'apprentissage.

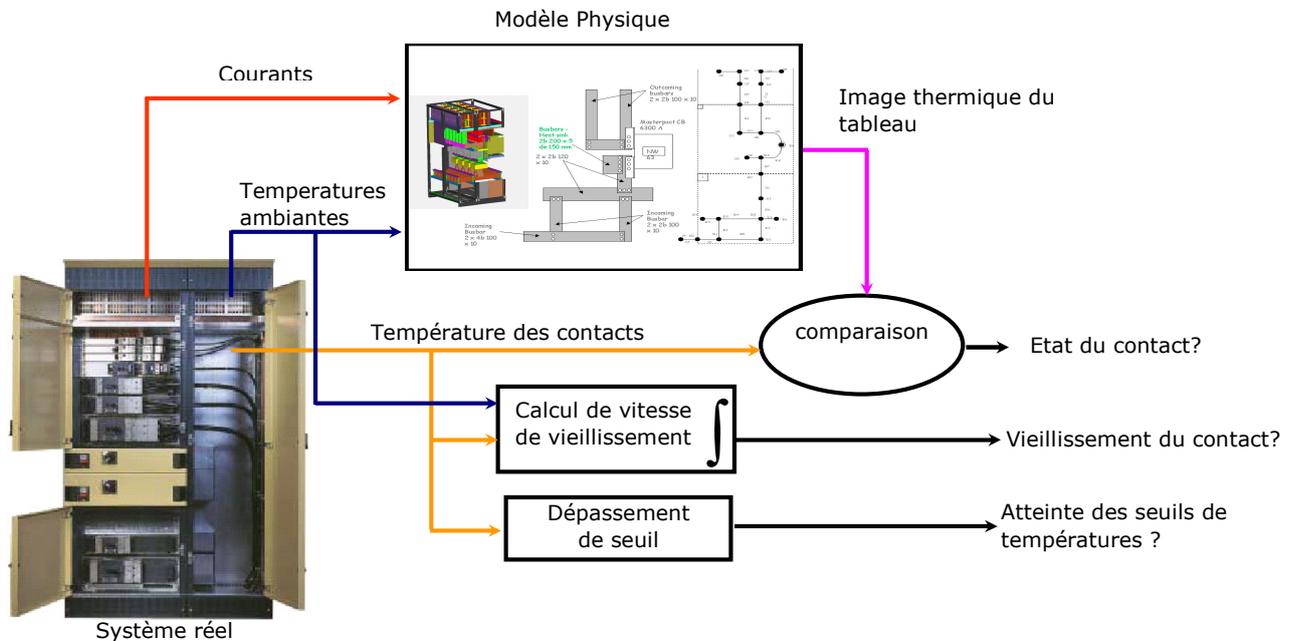


Figure 28 : Détection de l'état anormal d'un contact électrique

Dans la suite de ce rapport, nous présentons plus en profondeur la mise en œuvre de ces différents moyens de détection ainsi que des exemples illustratifs.

## I. Indicateur de franchissement des seuils de températures

Cet indicateur répond au besoin du client (exploitant du tableau électrique) de se référer à la norme pour qualifier l'état de son équipement. Il s'agit de comparer les valeurs de températures mesurées sur le système réel, aux seuils jugés critiques par la norme. En effet, tout dépassement des températures limites serait insupportable par l'utilisateur ou serait nuisible aux isolants qui se trouvent au contact ou à proximité du point chaud et contribuerait à accélérer la dégradation des éléments concernés. La norme IEC-60 439.1 donne les limites d'échauffement à ne pas dépasser

dans le tableau électrique. Ces valeurs sont calculées pour une température ambiante maximale de 40°C, la valeur moyenne mesurée sur une période de 24h n'excédant pas 35°C et la moyenne annuelle n'excédant pas 20°C. Le tableau suivant donne quelques exemples de limites d'échauffement.

<i>Constituant des tableaux électriques</i>	<i>Limites de températures admissibles</i>
Bornes pour câbles extérieurs,	+70°C
Organes manuels de commande métalliques	+15°C
Organes manuels de commande isolants	+25°C
Surfaces extérieures métalliques accessibles	+30°C
Surfaces extérieures isolantes accessibles	+40°C
Jeu de Barre souple isolée	+90°C
Enveloppe tôle	+30°C
Jeux de barres nus	+105°C

Tableau 3 : Echauffements limites des constituants du tableau.

En ce qui concerne les bornes pour câbles extérieurs, la norme donne 70°C d'échauffement pour une température ambiante de 35°C soit 105°C en absolu, correspondant à la limite de température du PVC (Polychlorure de vinyle) qui est la matière utilisée pour isoler les câbles.

Pour ce qui est de l'échauffement de la tôle de l'enveloppe, la norme indique une valeur de 30°C sous 35°C soit 65°C en absolu correspondant à la limite pour éviter une brûlure des doigts au toucher de l'enveloppe.

Les autres valeurs sont données en considérant la limite d'échauffement du matériau isolant directement en contact avec les composants. Nous retiendrons particulièrement les limites des bornes de raccordement (70°C) et celles des jeux de barres (105°C) car ils constituent les endroits où seront principalement posés les capteurs.

La détection de franchissement de seuil, à la limite de la prédiction, permet de ne pas laisser perdurer un état avancé de dégradation qui pourrait très rapidement dégénérer vers un amorçage.

## II. Indicateur de vieillissement

Cet indicateur, beaucoup plus que le premier, permet de prédire l'état anormal du contact avant une dégradation très avancée. Il s'agit d'intégrer le vécu du contact électrique à travers sa température. Il nous indiquera si le contact vieillit normalement ou plutôt de manière accélérée.

Le calcul de l'indicateur de vieillissement est basé sur la notion de facteur de doublement, utilisée par MONSINGER lors de ses études sur le vieillissement des isolants des transformateurs [17].

Pour comprendre cette notion, considérons un appareil fonctionnant à une température « T » et ayant une durée de vie probable « d », liée à son fonctionnement à « T ». Le facteur de doublement correspond alors à la quantité  $\Delta$ , telle que si la température de fonctionnement de l'appareil est augmentée de  $\Delta$ , alors sa durée de vie se trouvera divisée par 2. Autrement dit x heures de fonctionnement à T équivalent à  $\frac{x}{2}$  heures de fonctionnement à T +  $\Delta$  en terme de vieillissement.

Comme nous l'avons déjà expérimenté, le contact électrique vieillit. La norme IEC-60943 établit que le vieillissement du contact peut être quantifié au travers de deux principales contributions que sont :

- L'échauffement propre du contact par rapport au fluide environnant (caractérisé par le facteur de doublement  $\Delta_e$ ).
- La température ambiante du fluide dans lequel le contact baigne (caractérisé par le facteur de doublement  $\Delta_a$ ).

La norme IEC-60943 dit qu'un contact étant initialement conçu pour fonctionner avec un échauffement normal de  $\Delta T_c^{norm}$  par rapport à la température ambiante va trouver son vieillissement multiplié par un facteur  $K_c$ , si cet échauffement passe de  $\Delta T_c^{norm}$  à  $\Delta T_c$ , le coefficient  $K_c$  étant donné par :

$$K_c = 2^{\left( \frac{\Delta T_c - \Delta T_c^{norm}}{\Delta_e} \right)}$$

De même, si la température ambiante passe de la valeur  $T_a^{norm}$  à la valeur  $T_a$ , son vieillissement sera multiplié par le coefficient  $K_a$  donné par la formule :

$$K_a = 2^{\left(\frac{T_a - T_a^{norm}}{\Delta_a}\right)}$$

De manière logique, le facteur  $K$  de réduction totale de la durée de vie est donné par le produit des deux facteurs liés à l'échauffement propre et à la température ambiante. Nous avons donc

$$K = K_a * K_e$$

Autrement dit, 1 heure de fonctionnement dans une ambiante de température  $T_a$  avec un échauffement propre du contact de  $\Delta T_c$ , représenterait  $K$  heures de fonctionnement dans les conditions normales ( $T_a^{norm}$ ,  $\Delta T_c^{norm}$ ) avec :

$$K = 2^{\left(\frac{\Delta T_c - \Delta T_c^{norm}}{\Delta_c} + \frac{T_a - T_a^{norm}}{\Delta_a}\right)}$$

Le facteur  $K$  peut être interprété comme une vitesse de vieillissement. Ainsi si nous connaissons la durée totale de vie du contact dans les conditions normales d'utilisation nous pouvons en déduire le reste des jours à vivre  $((1-K)*\text{durée de vie normale})$ .

Ces différentes formules nous permettent de mettre au point un algorithme de suivi du vieillissement.

## 1. Algorithme de calcul du facteur de vieillissement

L'algorithme de calcul que nous proposons a été inspiré de celui de la norme IEC-60905 sur le calcul de vieillissement des transformateurs. A l'aide des formules précédentes, nous pouvons calculer le facteur de vieillissement horaire. L'intégration du vieillissement horaire sur 24 heures donne le vieillissement journalier. Le vieillissement courant est obtenu en intégrant ce dernier sur le nombre de jours écoulés.

### Facteur vieillissement horaire :

Compte tenu des formules précédentes, le facteur de vieillissement horaire est donné par la formule suivante :

$$Vh = 2 \left( \frac{\Delta T_c^h - \Delta T_c^{norm}}{\Delta_e^{norm}} + \frac{T_a^h - T_a^{norm}}{\Delta_a^{norm}} \right)$$

Où :

$\Delta T_c^h$  : Valeur moyenne de l'échauffement propre du contact sur 1 heure.

$\Delta T_c^{norm}$  : Valeur normale de l'échauffement pour la durée de vie garantie.

$T_a^h$  : Valeur moyenne de la température ambiante sur 1 heure.

$T_a^{norm}$  : Valeur normal de la température ambiante pour la durée de vie garantie.

$\Delta_e^{norm}$  : Facteur de doublement lié à l'échauffement propre.

$\Delta_a^{norm}$  : Facteur de doublement lié à la température ambiante.

### Facteur de vieillissement journalier:

$$Vj = \frac{\sum_{n=1..24} Vh}{24}$$

Le facteur de vieillissement journalier  $Vj$  se calcule chaque jour comme étant la moyenne des facteurs horaires  $Vh$  sur le nombre d'heures considérées (ici 24 heures). Il existe des sites fonctionnant 8 heures par jour. Le nombre d'heures considéré dans ce cas serait de 8.

### Facteur de vieillissement courant :

Le facteur de vieillissement courant est une moyenne des facteurs de vieillissement journalier sur le nombre de jours écoulés. Il se calcule donc par la formule suivante :

$$Vc = \frac{\sum_{i=1..J} Vj}{J}$$

$J$  étant le nombre de jours écoulés depuis le début de l'évaluation.

## 2. Exemple de simulation du calcul de vieillissement

Les conditions normales de fonctionnement d'un contact électrique peuvent être décrites comme suit: un échauffement propre du contact, inférieur à 70°C dans une ambiante intérieure inférieure à 60°C. Nous avons donc  $T_a^{norm} = 60^\circ C$  et  $\Delta T_c^{norm} = 70^\circ C$ .

Prenons l'exemple d'un contact mal serré et considérons qu'il vieillit selon une loi exponentielle dans le temps. En effet, la littérature nous indique que le vieillissement du contact se manifeste par une élévation de température très lente au départ et qui s'accélère par la suite d'où l'idée de prendre une description exponentielle du vieillissement. La Figure 29 montre ce que pourrait être l'évolution de la température de ce contact défaillant sur une période de 10 ans (courbe exponentielle rouge en trait plein). Sur cette figure nous pouvons aussi voir la température ambiante intérieure avec des alternances représentant les cycles été/hiver (courbe bleue trait plein). En additionnant cette dernière à l'échauffement propre, nous obtenons la température propre du contact qui alterne aussi suivant les mêmes cycles (courbe pointillée bleue).

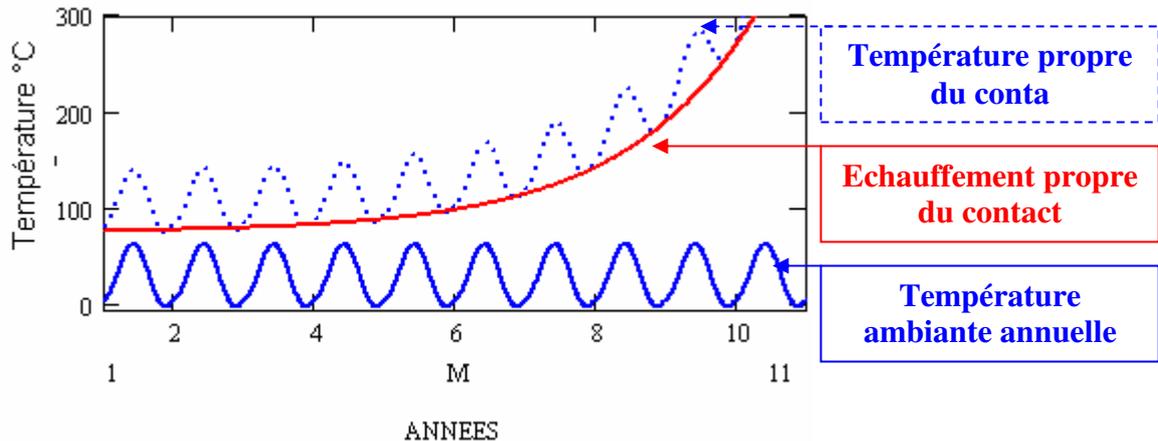


Figure 29 : Exemple de courbe d'évolution de l'échauffement propre et de la température d'un contact sur 10 ans.

A l'aide du logiciel MATCAD® [18] nous avons implanté l'algorithme de calcul de vieillissement (Cf. annexe5) et une simulation sur cet exemple précis. Ci-dessous les résultats de cette simulation (Figure 30).

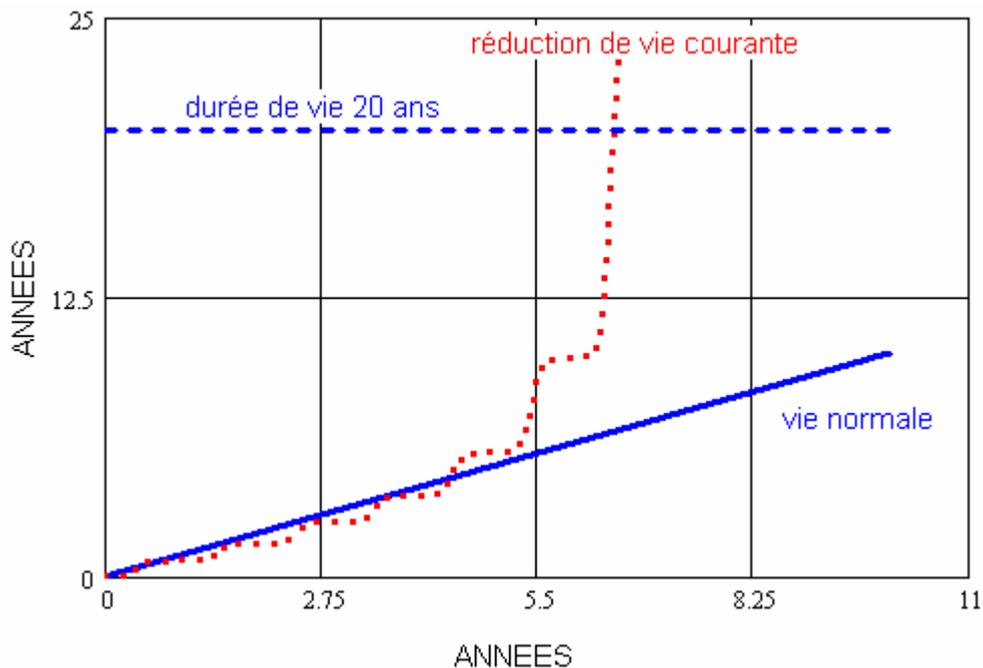


Figure 30 : Simulation du facteur de réduction de vie d'un contact défaillant sur 10 ans.

Sur cet exemple nous pouvons voir :

- La réduction normale de vie (droite à 45° en bleu) qui signifie qu'en un jour le contact vieillit d'un jour. C'est le vieillissement normal que le contact devrait avoir s'il fonctionnait dans les conditions nominales.
- La réduction de vie courante (facteur de vie courante), qui nous donne le vieillissement effectif compte tenu des températures réelles subissant le contact (courbe pointillée en rouge).
- La durée de vie totale du contact (20ans correspondant à la durée garantie par Schneider- Electric).

Nous remarquons que le facteur de réduction de vie courante nous permet de détecter une évolution anormale du vieillissement du contact. Car, à partir de la 5<sup>ième</sup> année de fonctionnement la courbe représentant le facteur de réduction de vie courante s'écarte de manière exponentielle de celle représentant le fonctionnement normal. Cette détection à partir de la 5<sup>ième</sup> année correspond à un niveau de dégradation relativement bas (partie plate de l'exponentielle sur la courbe d'échauffement de la Figure 29 ). Cet indicateur permet donc de détecter un état anormal de dégradation du contact avant qu'il ne soit trop avancé.

# **III. Détection de l'échauffement anormal par comparaison à un modèle physique**

Un contact électrique peut se trouver en surchauffe parce qu'il est dégradé, ou parce qu'il y passe plus de courant que prévu dans son dimensionnement. La méthode de comparaison à un modèle physique permet de mesurer l'adéquation entre le courant et la température mesurée. Elle s'appuie sur la modélisation du comportement thermique du tableau électrique sain. Il existe une multitude de logiciels de modélisation de systèmes électrothermiques. Ces logiciels, plus ou moins complexes, ont chacun leurs spécificités. Avant de faire notre choix, nous passons en revue les trois logiciels à notre disposition pour cette étude. Ces logiciels sont parmi les plus utilisés par les experts thermiques de Schneider-Electric pour le dimensionnement et la conception des appareillages des tableaux électriques.

## **1. Etat des lieux des logiciels de simulation à notre disposition**

### **1.1. Le logiciel ICEPAK**

C'est un logiciel destiné aux calculs de mécanique des fluides en régimes permanent ou transitoire. Le rayonnement et la convection y sont bien modélisés en 3D. Il fait un bon calcul de facteur de forme nécessaire à la bonne prise en compte des phénomènes radiatifs. C'est un logiciel utilisé à Schneider-Electric pour les calculs d'écoulement en 3D. Il est complexe à utiliser, compte tenu du nombre important de paramètres nécessaires pour faire fonctionner le modèle. En plus, pour des systèmes complexes, le modèle devient rapidement très lourd en terme de temps de calcul.

A Schneider-Electric, plusieurs travaux de modélisation du tableau électrique ou de ses constituants ont été réalisés pour simplifier la modélisation thermique du tableau. Certains ont abouti à la création de logiciels internes dont SOFOTHER-890 et EchaufPC.

## 1.2. Logiciel SOFTHET-890

Comme son nom l'indique, ce logiciel applique exactement le guide de calcul IEC-890 [19]. Ce guide nous donne une méthode de calcul de l'échauffement moyen de l'air dans une enveloppe en régime établi. Le calcul est basé sur la puissance dissipée à l'intérieur du tableau. Il se fait en trois étapes :

- Etape 1 : Calcul de la surface effective de refroidissement

$$A_e = \sum b * A_0$$

Où :

$A_e$  : Surface effective de refroidissement.

$A_0$  : Surface géométrique des cotés de l'enveloppe du tableau.

$b$  : Facteur de surface dépendant du type d'installation. Ce facteur prend en compte la dissipation de chaleur des surfaces individuelles  $A_0$  en fonction du type d'installation.

- Etape 2 : Calcul de l'échauffement à mi hauteur de l'enveloppe

$$\Delta t_{0,5} = k * d * p^x$$

Où :

$\Delta t_{0,5}$  : L'échauffement à mi hauteur de l'enveloppe.

$k$  : Constante d'enveloppe dépendant de la taille de la surface effective  $A_e$  de refroidissement pour les enveloppes sans orifices de ventilation et, en outre, de la section des orifices d'entrée d'air pour les enveloppes avec orifices de ventilation.

$d$  : Facteur d'échauffement dépendant du nombre de séparations horizontales internes du tableau.

$p$  : Puissance électrique dissipée.

$x$  : Dépend du type d'installation et de la taille de la surface effective de refroidissement. Il fait le lien entre l'échauffement de l'air interne et la puissance effectivement dissipée.

- Etape 3 : Calcul de l'échauffement de l'air dans la partie supérieure de l'enveloppe.

$$\Delta t_1 = c * \Delta t_{0,5}$$

Où :

$\Delta t_1$  : Echauffement de l'air dans la partie supérieure du tableau.

$c$  : Facteur de répartition de température.

Ce calcul est détaillé dans le guide IEC-890 qui donne aussi un exemple d'application. Par ailleurs, ce guide précise que la méthode n'est valable que dans certaines conditions parmi lesquelles nous pouvons citer :

- Une répartition sensiblement uniforme des puissances dissipées à l'intérieur de l'enveloppe.
- Pas plus de trois séparations horizontales dans l'ensemble ou dans une colonne de l'enveloppe.
- L'appareillage installé est disposé de façon à n'apporter qu'une légère gêne à la circulation de l'air.
- Pour les enveloppes avec orifices de ventilation, la section des orifices de sortie d'air est au moins 1.1 fois la section des orifices d'entrée.

La méthode de calcul IEC-890 semble donc être destinée aux tableaux où la convection est le phénomène le plus important. Si cette méthode peut convenir dans le cas des petits coffrets sans cloisons internes, elle n'est que difficilement applicable aux grands tableaux de distribution. En effet ces derniers sont souvent très compartimentés pour des raisons de sécurité des usagers, limitant ainsi les transferts convectifs.

### **1.3. Le Logiciel ECHAUFPC**

ECHAUFPC est un logiciel basé sur la représentation du système à modéliser par un réseau de nœuds reliés entre eux par des conductances thermiques (convectives, conductives, radiatives). Il permet de réaliser des analyses thermiques en régime permanent ou transitoire. Il est adapté à un système où la conduction est le phénomène le plus important. Les conductances convectives et radiatives sont calculées à partir des coefficients d'échanges radiatifs et convectifs. Aucun calcul de facteur de forme n'est effectué.

- Les éléments 0 D ou nœuds

Ils représentent principalement les contacts électriques. Ils sont alors caractérisés par deux paramètres que sont la résistance thermique de contact et la résistance électrique de contact. Des nœuds peuvent être aussi placés sur les conducteurs aux points où on veut connaître la température, sans qu'il n'y ait de connexions en réalité.

- Les éléments 1D ou liaisons

Ces éléments lient les différents nœuds. Ils représentent les conducteurs, les jeux de barres et les câbles entre deux connexions. Ils sont caractérisés par des paramètres tels que :

- leurs dimensions (longueurs, hauteurs, largeurs),
- leurs surfaces d'échanges,
- la surface d'échange des isolants qui les recouvrent.
- Les éléments 2D ou cloisons.

Ces éléments modélisent les surfaces des enveloppes et des cloisons. Ils sont caractérisés par leur dimension et les coefficients d'échanges convectifs et radiatifs. Les éléments 2D sont utilisés pour coupler thermiquement deux volumes qui échangent thermiquement.

- Les éléments 3D ou volumes.

Ces éléments modélisent les différents compartiments du tableau électrique ou de l'appareillage. Ils sont caractérisés par leurs dimensions. Les échanges entre volumes se font via les éléments 2D qui les lient. La température dans le volume peut être calculé par le programme ou fixé par l'utilisateur.

## Conclusion

Notre choix pour la modélisation thermique des tableaux électriques en vue de la détection de l'échauffement anormal du contact, s'est porté sur EchaufPC pour trois raisons principales :

1. La première raison est que EchaufPC modélise bien la conduction qui est le phénomène d'échange le plus important dans les tableaux électriques.
2. La deuxième raison est qu'il est moins complexe que les autres logiciels à notre disposition, du point de vue des paramètres nécessaires à la modélisation.
3. La troisième raison est que ce logiciel possède une base de données de modèles des disjoncteurs Schneider Electric.

Dans le chapitre suivant, nous décrivons les différentes étapes d'une modélisation à l'aide d'EchaufPC ainsi qu'un exemple d'application. Par ailleurs, pour les besoins de la détection en ligne, le Logiciel EchaufPC a dû être modifié. Nous donnons aussi par la suite l'architecture du nouveau logiciel (EchaufWeb) implanté à partir du noyau de calcul d'EchaufPC.

## 2. Détection d'échauffement anormal à l'aide d'EchaufPC

### 2.1. Modélisation EchaufPC

La modélisation d'un équipement à l'aide d'EchaufPC se fait en 5 étapes partant de la définition du système à étudier jusqu'à la simulation proprement dite. Ces étapes décrites à la Figure 31 sont détaillées ci-dessous.

L'étape 1 consiste à construire sur une feuille de brouillon un schéma (prémodèle) du système à modéliser. Cette étape sert à identifier et à définir les objets EchaufPC (0 D, 1D....3D) nécessaires à la construction du modèle dans EchaufPC.

L'Etape2 consiste à créer dans EchaufPC (en s'aidant du prémodèle de l'étape 1), les différents éléments du modèle, c'est-à-dire les volumes, les cloisons et le réseau de nœuds et de liaisons appelé « chaîne conduire ». La description de cette chaîne permet non seulement d'effectuer les calculs de conduction thermique mais aussi de prendre en compte l'aspect électrique du problème.

L'étape 3 consiste à entrer les valeurs des différents paramètres du modèle. En effet, pour simuler le comportement thermique d'un tableau sous EchaufPC, il est nécessaire de renseigner principalement :

- Les paramètres géométriques (sections, volumes, longueurs...) des différents éléments (compartiments, enveloppe, jeu de barres, câbles ...).
- Les différents coefficients d'échanges radiatif et convectif des jeux de barre, des câbles et des surfaces. Le programme peut aussi les calculer. Des coefficients d'ajustement peuvent alors être utilisés pour ajuster les coefficients calculés.
- Le courant traversant les différents circuits du tableau électrique
- La température ambiante des différents compartiments. Elle peut être calculée par le programme où donnée en entrée. Même si cela impose des points de mesures supplémentaires, la mise de ce paramètre comme une entrée a le précieux avantage de rendre le modèle beaucoup plus robuste aux erreurs faites sur les coefficients d'échanges.

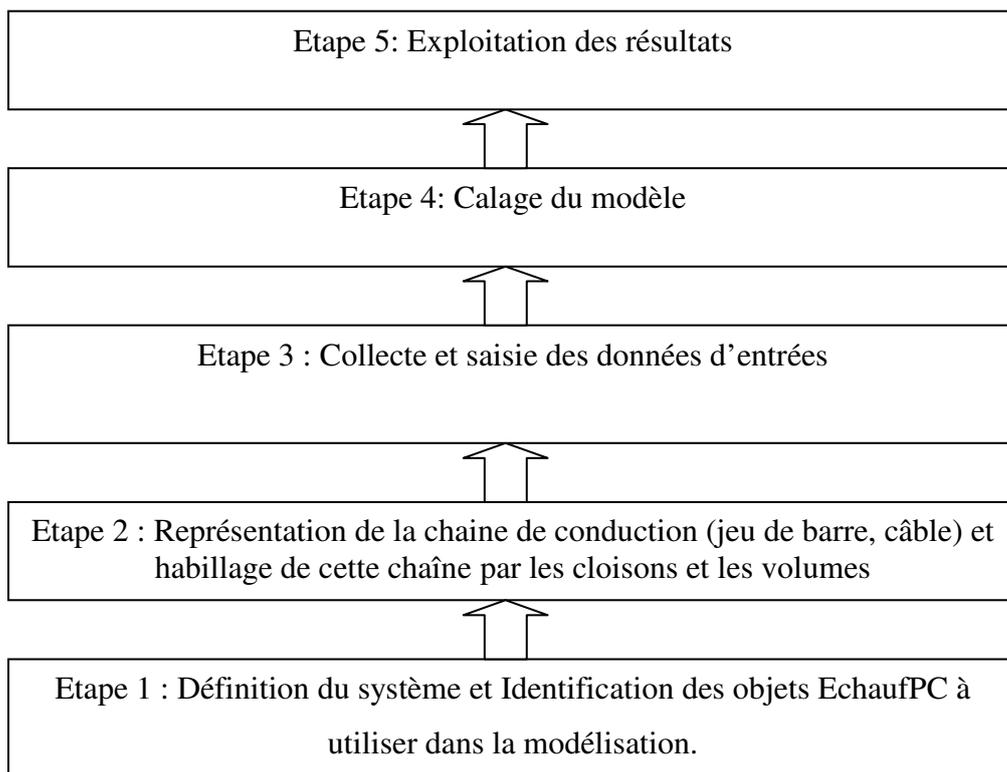


Figure 31 : Les étapes de la modélisation sous EchaufPC.

L'étape 4 : l'étape 4 est celle de calage du modèle, en jouant sur ses paramètres pour minimiser l'écart entre températures mesurées et températures calculées par le modèle. Les principaux paramètres de calage sont :

- les résistances (électriques et thermiques),
- les périmètres et surfaces d'échanges,
- les coefficients multiplicateurs des paramètres d'échanges thermiques.

Comme cela fait beaucoup de paramètres, la stratégie adoptée est de faire varier autant que possible les paramètres dont nous n'avons pas d'ordre de grandeur (coefficients et périmètres d'échanges...), et de laisser les paramètres dont on a un ordre de grandeurs (résistances de contact, dimensions...) le plus proche possible des valeurs de référence.

Le calage est réalisé sur un tableau sain et pour un niveau de courant voisin du courant d'utilisation car le modèle est d'autant plus valide qu'il est utilisé près des conditions de calage.

L'étape 5 Une fois le modèle « calé » l'étape 5 est l'étape de simulation et d'analyse des résultats. Les variables de sortie d'EchaufPC sont les températures aux différents nœuds sélectionnés. EchaufPC donne aussi en sortie le bilan des puissances thermiques échangées pour chaque élément du modèle. Nous nous intéresserons plus particulièrement aux températures des nœuds.

## 2.2. Exemple test de la méthode.

Prenons l'exemple du montage expérimental de la Figure 32. Il s'agit d'un disjoncteur NS630 de courant nominal 630A, installé dans une enveloppe.

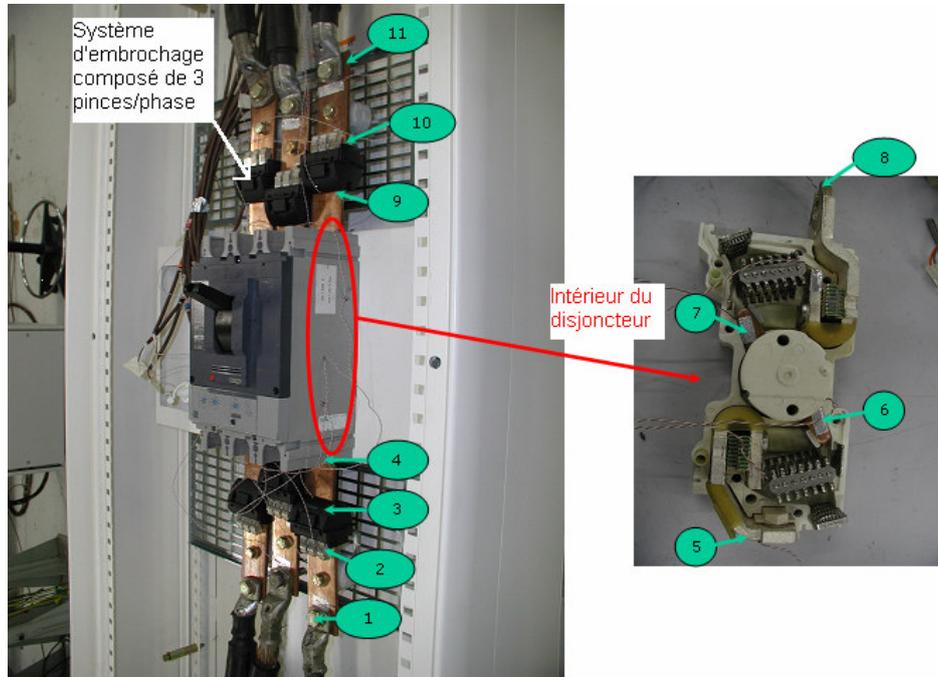


Figure 32 : Montage réel d'un disjoncteur dans une enveloppe.

Dans ce paragraphe, nous modélisons le système sain. Nous comparons par la suite les résultats donnés par le modèle calé sur le système sain aux données expérimentales obtenues en présence de défaut pour détecter un échauffement anormal.

Pour chaque phase, le système d'embrochage est constitué de trois pinces comme le montre la Figure 32. Le défaut consistera à ne mettre que deux pinces au lieu des trois normalement préconisées.

La Figure 33 est une représentation schématique du montage où l'on peut distinguer les jeux de barres, les câbles, les points de connexions et l'intérieur du disjoncteur.

A partir de ce schéma nous pouvons faire un autre schéma dit de pré-modèle (Figure 34) qui se rapproche beaucoup plus du modèle EchaufPC. Dans ce dernier schéma simplifié, les connexions sont numérotées de 1 à 11. Elles sont liées entre elles par des liaisons, formant ainsi le circuit de conduction qui est englobé dans des rectangles qui représentent l'enveloppe du disjoncteur et celui du tableau (Figure 8). Comme dit précédemment, EchaufPC n'ayant pas d'interface graphique, nous

passons par ces différents schémas faits à la main, pour mieux identifier et visualiser les différents éléments du modèle avant de les créer dans EchaufPC.

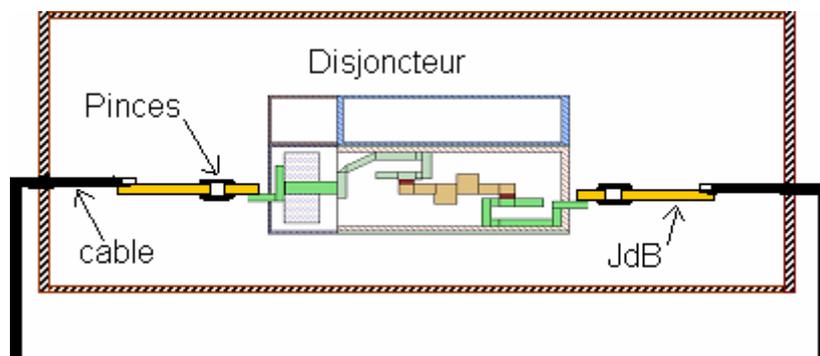


Figure 33 : Schéma du montage de la Figure 32

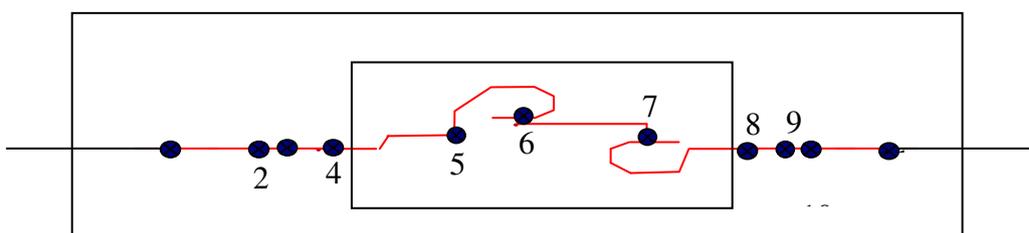


Figure 34 : Prémontage du montage de la Figure 32.

Par la suite, en s'aidant de la Figure 34, les différents éléments du modèle sont créés dans EchaufPC et leurs caractéristiques physiques (les surfaces d'échange, les dimensions, les résistances thermiques et électriques...) y sont renseignées. Le courant (630A) circulant dans le montage et les températures ambiantes (extérieure et intérieure de l'armoire) sont aussi donnés comme paramètres d'entrée. La Figure 35 donne le profil de température obtenu après la phase de calage.

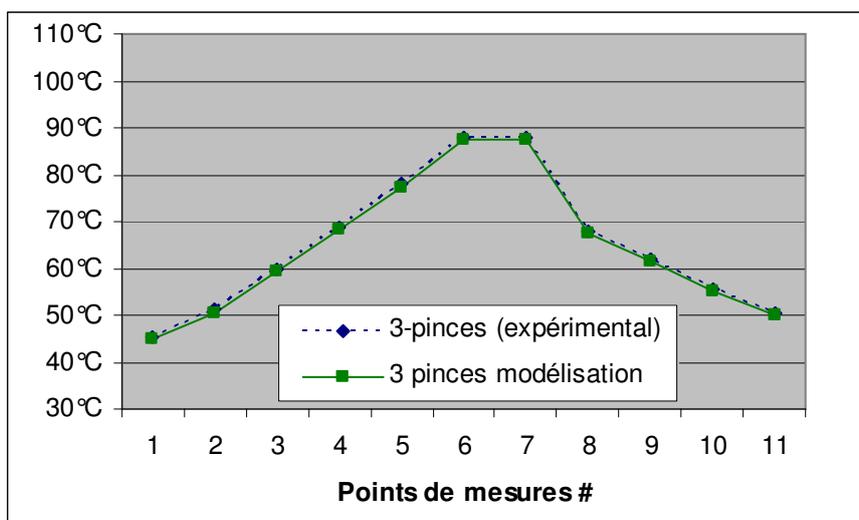


Figure 35 : Calage de modèle sous EchaufPC.

Ce profil résultant de la modélisation est comparé à celui obtenu expérimentalement. Nous remarquons qu'il approche le résultat expérimental avec une erreur absolue sur chaque point de mesure inférieure ou égale à  $\pm 1,2^{\circ}\text{C}$ , ce qui est satisfaisant sachant que l'erreur due à la chaîne d'acquisition est d'environ  $\pm 1^{\circ}\text{C}$ .

Dans la suite de ce test, nous créons un défaut de pince. La Figure 36 est une comparaison entre le modèle (sous EchaufPC) du système sain et les données expérimentales avec le défaut de pince. Nous remarquons que la diminution du nombre de pinces a pour effet d'élever le profil de température. L'échauffement anormal observé en comparant le modèle et l'expérience s'explique par deux raisons :

- En diminuant le nombre de pinces nous augmentons la résistance électrique de contact. Le contact devient donc le siège d'une plus forte création de chaleur.
- En diminuant le nombre de pinces nous augmentons aussi la résistance thermique de contact. Donc la chaleur produite par le disjoncteur est piégée entre les bouchons thermiques créés de part et d'autre du disjoncteur par ces contacts défectueux.

Cela entraîne un échauffement important de tous les points qui se trouvent entre les pinces (points 3 à 9), rendant le défaut difficilement localisable. Toutefois nous pouvons remarquer que le gradient de température au niveau des pinces en défaut est élevé (passage du point 2 à 3 et aussi du point 10 à 9), ce qui pourrait nous guider dans la localisation du défaut.

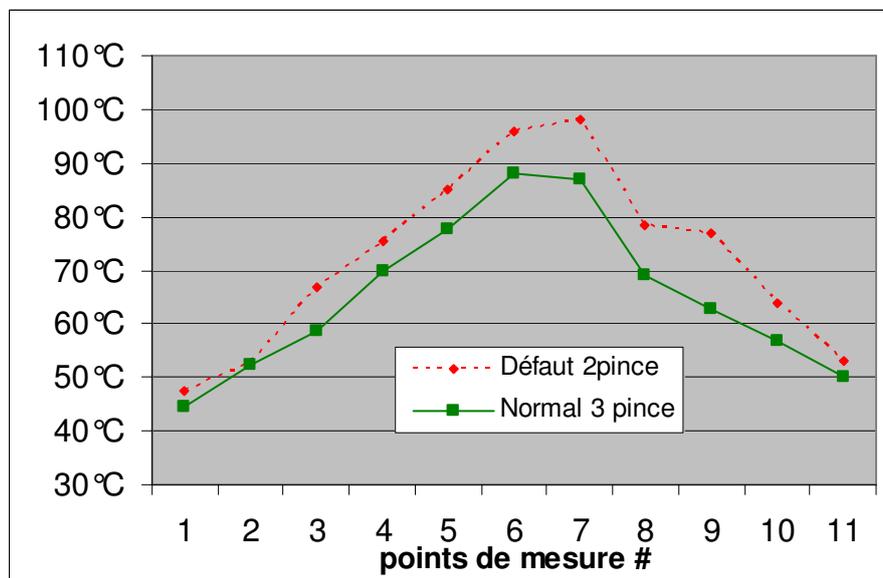


Figure 36 : Détection d'échauffements anormaux par comparaison du modèle et de l'expérience.

## Remarques

A travers cet exemple nous voyons que la comparaison entre le modèle thermique jugé sain et le système réel peut être un moyen de détecter une défaillance des contacts électriques très tôt avant même que ceux-ci n'atteignent les températures d'échauffement limites données par la norme. C'est l'exemple des points de contacts 3 et 9 qui ont une température inférieure à 80°C alors que la température limite donnée par la norme est de 105°C.

### 3. De EchaufPC à EchaufWeb

Le logiciel EchaufPC a été initialement conçu pour des experts du dimensionnement thermique et de la conception de tableaux électriques.

L'outil de détection que nous voulons mettre en place est destiné à communiquer via internet pour la récupération de certains paramètres (courants, températures) et pour l'affichage des résultats de calculs. Ce n'est pas le cas d'EchaufPC qui n'était pas conçu pour cela. De plus son utilisation est difficile par le fait qu'il ne possède pas d'interface graphique pour dessiner et visualiser le tableau dans son ensemble.

Aussi, le logiciel EchaufWeb a été créé durant cette thèse, à partir du noyau de calcul d'EchaufPC. Ceci, pour d'une part l'adapter au besoin de communication par le web, et d'autre part, pour le rendre plus accessible et convivial dans son utilisation.

Outre l'encadrement fonctionnel de son développement, notre travail dans la mise en œuvre de ce logiciel a consisté à :

- Spécifier le cahier des charges en définissant :
  - L'interface graphique.
  - Les nouvelles fonctionnalités pour simplifier la saisie des paramètres du modèle par exemple les fonctions « duplication des éléments du modèle » et « annulation de la duplication »
  - Les paramètres indispensables, à la modélisation pour la détection, de façon à n'en garder que ceux-ci afin d'alléger l'interface graphique.
- Procéder aux tests du logiciel.

Le développement d'EchaufWeb a nécessité 9 mois de travail incluant la spécification et le codage proprement dit par 4 stagiaires DESS.

Le principe d'EchauWeb est représenté à la Figure 37. Le logiciel est utilisable en local, sur une machine où il a été préalablement installé ou en ligne par l'intermédiaire d'un serveur de Schneider Electric. L'utilisation en ligne ne permet que la simulation sur un modèle validé de tableau existant. L'utilisation en local permet la modélisation d'un tableau et le calage du modèle.

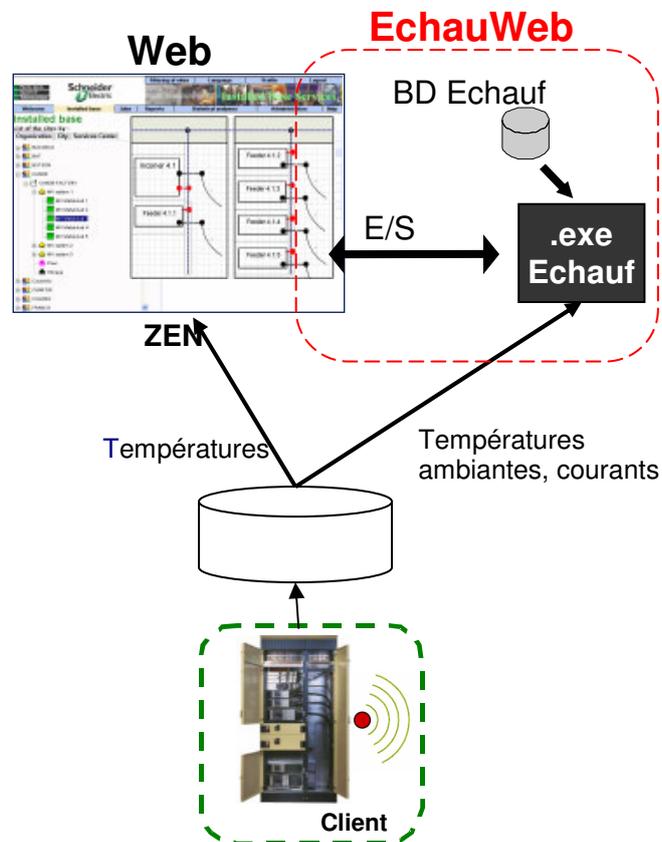


Figure 37 : Principe de fonctionnement d'EchauWeb.

Pour plus de détail sur le fonctionnement de ce logiciel il est possible de se reporter au rapport du stage qui a abouti à la création du logiciel [20].

Une application de ce logiciel pour la détection est décrite dans le chapitre 6 de ce document.

# **IV. Détection de l'échauffement anormal par les réseaux de neurones**

Un autre moyen de détection de l'état anormal des contacts électriques est d'utiliser la technique des réseaux de neurones. Avant de parler de l'application qui en est faite, il semble nécessaire de faire un rappel théorique sur cet outil mathématique.

## **1. Des neurones biologiques aux neurones artificiels**

Les réseaux de neurones artificiels sont un moyen original de traitement de l'information inspiré du fonctionnement des neurones biologiques. En effet, dans le système nerveux humain, les neurones reçoivent l'information sous forme d'impulsions électriques ou influx nerveux. La liaison entre les neurones biologiques se fait via des dendrites. Les connexions au niveau des dendrites sont appelées synapses. C'est au passage à travers les synapses que le signal est amplifié ou atténué donnant ainsi aux neurones la capacité d'influencer plus ou moins leurs voisins.

Une interprétation simple de ce mode de fonctionnement conduit au modèle de perceptron présenté par Rosenblatt, F (1962)-[21] :

- L'intensité des signaux transmis entre neurones est modulée par des coefficients appelés « poids synaptiques » ( $W_i$ ).
- Le neurone est un automate à seuil. Si l'intensité totale de signal reçu dépasse un certain niveau, il est propagé sinon il ne l'est pas. Cela est matérialisé par une fonction d'activation.

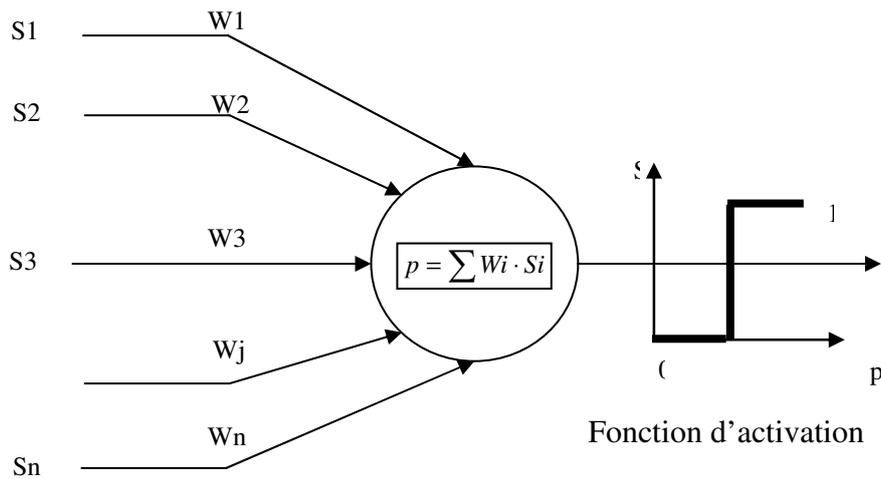


Figure 38 : Modélisation et activation d'un neurone artificiel (perceptron).

Ainsi un neurone artificiel réalise une fonction non linéaire paramétrée à valeurs bornées. L'intérêt des neurones réside dans la capacité à les mettre en réseau pour approximer des fonctions complexes non linéaires.

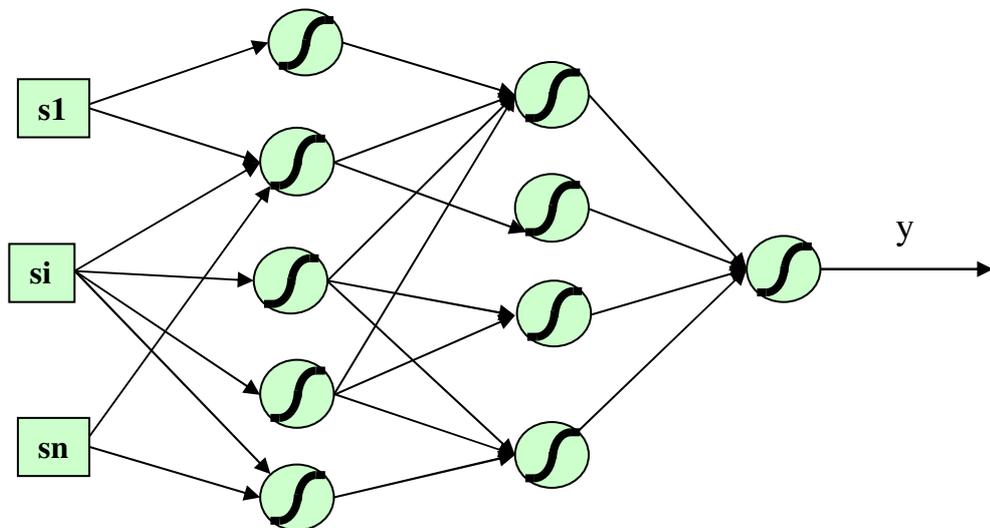


Figure 39 : Un réseau de neurone à n entrées, deux couches cachées de neurones et 1 neurone de sortie.

Il existe plusieurs types de réseaux de neurones. Ils peuvent être classés suivant la manière dont les différents neurones qui les constituent sont connectés entre eux. Dans certains cas, les neurones peuvent être connectés en couches (Figure 39), les connexions ne pouvant exister qu'entre les couches successives dans un seul sens (entrée → sortie). Ce type de réseau est appelé perceptrons

multicouches ou MLP (Multiple layer perceptrons). Dans d'autres cas, les connexions peuvent exister entre certaines sorties et les entrées dont elles sont issues, ce sont des réseaux récurrents. Dans la suite de notre étude, nous utiliserons les MLP car leur utilisation est aujourd'hui largement répandue et ils ont fait l'objet de recherches très poussées. Ces recherches ont prouvé que les MLP avec un nombre de couches au moins égal à 3 sont capables de modéliser tout type de fonctions suffisamment régulières [22]. On dit qu'ils sont des approximateurs universels.

Les réseaux de neurones peuvent ainsi être des outils très puissants permettant de modéliser, sur des systèmes complexes, la « fonction frontière » séparant les points de fonctionnement saint de ceux avec défaut. La question qui se pose d'ores et déjà est comment trouver les poids du réseau de façon à ce qu'il approxime au mieux cette « fonction frontière ». En général cela se fait par une étape au cours de laquelle les paramètres du réseau sont progressivement modifiés pour que la sortie du réseau soit celle désirée, à quelques erreurs près. C'est le processus d'apprentissage.

## **2. L'apprentissage des réseaux de neurones**

L'apprentissage peut être défini comme étant : « ...le mécanisme par lequel les paramètres libres d'un réseau de neurones sont adaptés à travers un processus de stimulation par l'environnement dans lequel le réseau est intégré ». Autrement dit, le processus d'apprentissage consiste à estimer les paramètres des neurones du réseau afin que celui-ci remplisse au mieux la tâche qui lui est assignée [23].

Pour mieux comprendre, considérons un exemple de tri de mangues et d'oranges (arrivant tous dans les mêmes paniers). Supposons que nous sommes chargés d'automatiser ce tri. Le poids et la texture pourraient être deux éléments discriminants, sachant que les mangues ont souvent un poids plus élevé que les oranges, lesquelles présentent, dans la plupart des cas, une texture plus rugueuse que les mangues.

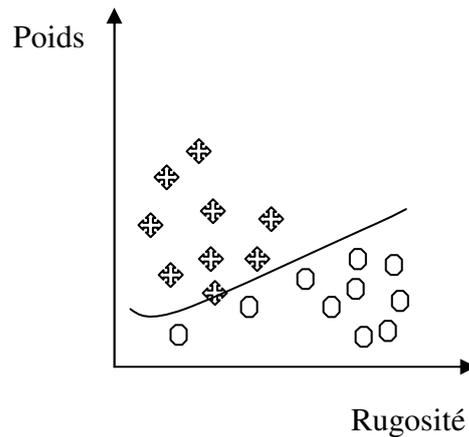


Figure 40 : Problème de tri de fruits (orange et mangue).

Dans notre exemple, considérons que nous connaissons, pour un échantillon de paniers, le poids et la rugosité de tous les fruits contenus dans le panier (mangue, orange). Nous pouvons visualiser cet échantillon sur la Figure 40, les oranges étant représentées par des ronds et les mangues par des croix. Nous pouvons alors tracer la frontière entre « mangue » et « orange ». La fonction décrivant cette frontière peut être estimée à l'aide d'un réseau de neurones dont les entrées sont la rugosité et le poids du fruit et la sortie est le type de fruit. Le processus d'apprentissage consiste à adapter les poids internes du réseau de sorte à ce que, pour l'échantillon disponible, les couples entrées-sortie du réseau s'approchent au mieux des couples de l'échantillon. Cela revient donc à un problème de régression. Ce type d'apprentissage est dit supervisé car il est fait à partir d'une série de vecteurs « entrées, sorties » connus. Il existe un apprentissage non supervisé souvent appliqué aux réseaux bouclés.

Un fois l'apprentissage fait, nous pouvons utiliser la fonction frontière estimée pour automatiser le processus de tri des fruits. Les mangues se situent en général sur la partie supérieure et les oranges sur la partie inférieure. Il suffit donc de localiser la nouvelle entrée par rapport à cette courbe pour savoir dire si c'est probablement une « mangue » ou une « orange ». Cette capacité à bien classifier les nouveaux cas qui sont présentés au réseau s'appelle la généralisation.

L'algorithme d'apprentissage que nous avons mis en œuvre est l'algorithme de Levenberg Marquardt [24] qui est une version améliorée (en terme de temps de calcul) de l'algorithme de retro propagation du gradient qui comporte deux étapes:

- Une première étape de calcul des dérivées de la fonction d'erreur (sortie désirée – sortie calculée) par rapport aux poids du réseau. La technique utilisée pour le calcul est celle de la retro propagation [25]-[26].

- Une deuxième étape où les dérivées sont utilisées pour ajuster les poids du réseau selon la technique de la descente du gradient.

Cet algorithme adapté au MLP est particulièrement efficace dans le cas d'un apprentissage supervisé. L'inconvénient de l'algorithme de Levenberg Marquardt est qu'il est basé sur le calcul d'une matrice Jacobienne dont l'inversion est très gourmande en mémoire. Cependant il est très bien adapté aux petits réseaux comme celui que nous allons tester dans la suite.

## **3. Application des réseaux de neurones à la détection automatique de contacts défectueux**

Dans ce chapitre, nous utilisons la technique des réseaux de neurones pour détecter automatiquement les contacts défectueux. Le but visé est de partir des mesures de températures et de courants sur le tableau électrique pour déterminer si le contact est défectueux ou non. L'approximation de la fonction qui permet cette séparation entre les bons contacts et les mauvais, passe par une phase d'apprentissage. Pour ce faire nous devons constituer une base de vecteurs entrées/sorties à l'aide des données enregistrées (courant, température, couple de serrage) lors de différentes expériences que nous avons effectuées sur les contacts électriques.

### **3.1. Les entrées du modèle**

Pour chaque contact, les entrées principales du modèle sont le courant dans le contact et l'échauffement du contact. L'échauffement est calculé par rapport à la température ambiante à l'intérieure du tableau ( $T^{\circ}C_{contact} - T^{\circ}C_{ambianteInterne}$ ). Nous choisissons comme entrées complémentaires les dérivées premières du courant et de l'échauffement. Ces entrées complémentaires contribuent à donner plus d'informations au réseau de neurone. En effet la dynamique de la température d'un contact électrique est liée non seulement au courant, mais aussi à sa résistance électrique. En théorie, plus grande est la résistance de contact électrique, plus petite est sa constante de temps.

### **3.2. La sortie du modèle**

La sortie du réseau de neurone dans notre problème est une valeur indiquant l'état du contact.

Au cours de l'expérience de desserrage progressif que nous avons menée sur la famille des contacts boulonnés, nous avons pu constater qu'en général, un contact électrique engendre un échauffement

notable à partir d'un desserrage à  $1/8^{\text{ième}}$  de son couple nominal. Ainsi pour un contact boulonné, nous considérons qu'un desserrage à un couple inférieur à  $1/8^{\text{ième}}$  de son couple nominal est inacceptable. En dessous de ce couple de serrage le contact est déclaré défaillant.

Par ailleurs, en ce qui concerne les pinces d'embrochages pour lesquelles il n'y a pas de notion de serrage, le contact a été considéré comme défaillant à partir d'un nombre de pinces inférieur ou égal à deux (le contact normal étant constitué de trois pinces).

Dans les deux cas, cela revient d'une certaine manière à associer l'état du contact à sa résistance électrique. Un contact très résistif est considéré comme défaillant.

### **3.3. Apprentissage du modèle de détection**

Le réseau de neurones utilisé pour modéliser le problème de détection des contacts défaillants est un MLP composé de 3 couches et d'une trentaine de neurones. Nous avons choisi un réseau de trois couches car, comme nous l'avons dit précédemment, un tel réseau est théoriquement capable de modéliser toute fonction suffisamment régulière. L'algorithme d'apprentissage est celui de Levenberg Marquardt car il est très rapide et adapté au petit réseau qui ne nécessite pas beaucoup d'espace mémoire pour les calculs. Un nombre important de neurones devrait permettre d'avoir une erreur d'apprentissage minimale, cependant il n'augmenterait pas forcément (et pourrait même dégrader) la capacité du réseau à prédire de nouveaux cas. Le plus important est de trouver un réseau ayant une bonne capacité de généralisation avec un nombre de neurones le moins élevé possible (pour avoir un temps de calculs raisonnable). Dans notre cas cela s'est fait en plusieurs essais avec un nombre de neurones croissant et réparti assez uniformément sur les différentes couches. Ainsi nous avons obtenu la trentaine de neurones qui semblent bien convenir (cf. Résultats).

Dans notre exemple test, la base de données expérimentales est composée de 8000 couples entrées/sorties. Cette base a été divisée en deux parties égales, l'une servant à l'apprentissage (base d'apprentissage) et l'autre à la validation (base de validation).

### **3.4. Résultats**

Deux cas de figures ont été testés :

- Cas1 : la base d'apprentissage ne contenait que des vecteurs liés à la partie transitoire de nos expériences.
- Cas2 : la base d'apprentissage a été constituée à partir d'un tirage aléatoire dans l'ensemble des vecteurs à notre disposition.

Dans le premier cas, nous avons 1% d'erreur de classification à l'étape d'apprentissage et plus de 30% pour l'étape de validation. Dans ce cas de figure, le réseau a du mal à généraliser son résultat.

Dans le deuxième cas, nous avons, 10% d'erreur de classification dans l'étape d'apprentissage et aussi 10% pour l'étape de validation, ce qui dénote une bonne capacité de généralisation du réseau de neurones ainsi paramétré. Comparativement au premier cas, ce réseau est beaucoup plus susceptible de donner la bonne classification pour les nouvelles entrées qui lui seront présentées.

La Figure 41 donne un aperçu des résultats de validation.

Nous pouvons voir sur cette figure :

- Le profil de températures (mesurées sur les contacts électriques), en entrée du réseau de neurones, dont les valeurs sont liées à l'état de dégradation du contact.
- La sortie estimée par le réseau et celle obtenue expérimentalement. Les valeurs basses correspondent à un état normal du contact tandis que les valeurs hautes correspondent à un contact dégradé (desserré).

Nous pouvons remarquer que la sortie expérimentale et celle estimée sont très proches, surtout sur les parties où la température a atteint le régime permanent. En régime transitoire, le réseau estime moins bien la sortie.

Ce test donne des résultats intéressants et permet donc de conclure positivement sur la faisabilité de la méthode.

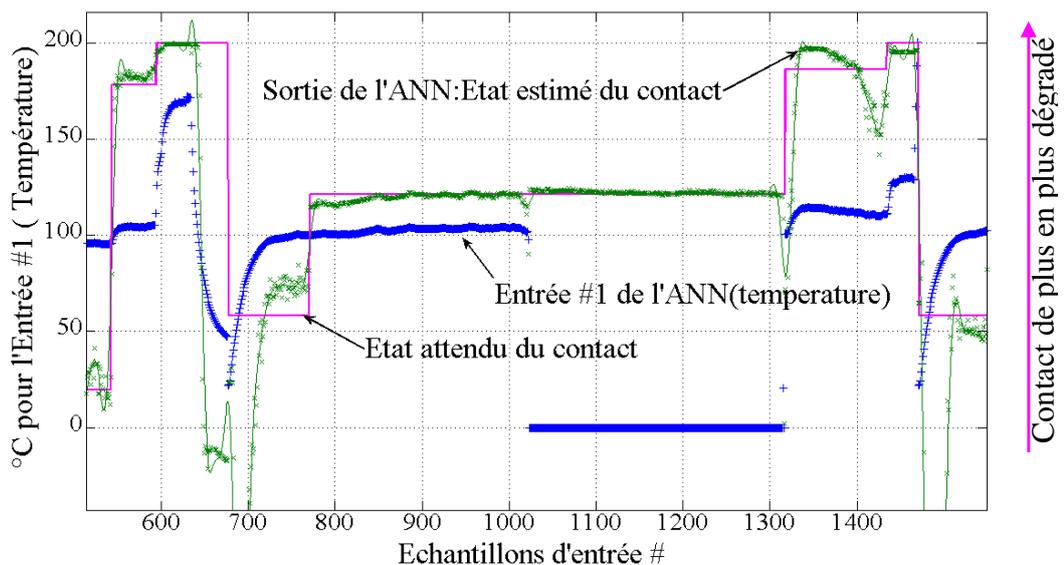


Figure 41 : Test du réseau de neurones après apprentissage.

# CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons présenté 4 indicateurs ou méthodes aidant à détecter l'échauffement anormal du contact ou son niveau de dégradation.

Les deux premiers indicateurs, à savoir « le dépassement des seuils d'échauffement donnés par la norme » et « le facteur de vieillissement » sont mis en œuvre uniquement à partir des données de températures. Le premier, correspondant en général à un niveau avancé de dégradation, donne une alarme lorsque le seuil d'échauffement indiqué par la norme est atteint. Le deuxième permet de détecter un vieillissement accéléré du contact avant que celui-ci n'atteigne sa fin de vie (garantie 20 ans par Schneider-Electric).

Les deux autres méthodes de détection sont basées sur la mesure de l'adéquation entre le courant et la température. L'une se fait à partir d'un modèle électrothermique via le logiciel EchaufWeb développé à partir du noyau de calcul d'EchaufPC. L'autre se fait par la technique des réseaux de neurones qui permet d'apprendre et de reconnaître les cas de défaillance. Ces deux méthodes ont été testées sur des données réelles et donnent des résultats qui nous permettent de conclure positivement sur leurs faisabilités.

Après l'étape de détection, vient logiquement celle du diagnostic, c'est-à-dire l'explication des causes de la défaillance constatée. Dans la suite de cette étude nous présentons un moyen de réaliser un diagnostic automatique sur l'ensemble du tableau électrique en utilisant non seulement le résultat de la détection mais aussi d'autres variables liées à l'environnement de fonctionnement du tableau électrique.



## Chapitre5

# SYSTEME DE DIAGNOSTIC

---



# SYSTEME DE DIAGNOSTIC

## Introduction :

Aujourd'hui, lorsqu'une défaillance apparaît sur un équipement électrique, les experts vont sur site pour chercher des indications qui pourraient les aider à identifier les causes réelles de la défaillance. Plus précisément, ayant une idée du type de défaillance, ils cherchent la cause dans une famille de causes probables et arrivent par un processus d'élimination à trouver la plus vraisemblable. L'un des inconvénients de cette méthode est son coût, car trouver la cause réelle peut prendre beaucoup de temps. En plus de cela, la pertinence des conclusions est très liée au degré d'expertise de l'expert.

Fort de ce constat, dans le cas particulier des tableaux électriques, nous souhaitons mettre en place un système qui automatise le raisonnement des experts afin de réduire le temps d'expertise. Ce système doit aussi être capable de capitaliser l'expérience des différents cas de défaillances rencontrés afin d'affiner les conclusions sur les futurs cas et rendre ces conclusions moins tributaires de l'expertise initiale.

Le raisonnement probabiliste et inférentiel des experts nous conduit naturellement à l'utilisation des réseaux Bayésiens afin de pouvoir représenter leur connaissance et automatiser leur raisonnement.

Plusieurs autres techniques de représentation pourraient être utilisées (Arbre de défaillance, logique floue, système expert, arbre de décision...), mais la préférence donnée aux réseaux Bayésiens tient plus particulièrement à leur polyvalence. En l'occurrence, on peut se servir du même modèle pour diagnostiquer (conséquences → causes) ou faire des analyses prédictives de risques (causes → conséquences).

L'intérêt des réseaux Bayésiens réside aussi dans leur capacité à tenir compte dans le même modèle de plusieurs types d'informations (informations subjectives d'experts et celles issues du traitement statistique de données).

Enfin, la représentation graphique des réseaux Bayésiens est intuitive et compréhensible par un non spécialiste. Cela explique leur utilisation de plus en plus grande dans le domaine médical et industriel où ils montrent des résultats encourageants. En guise d'exemple, nous pouvons citer le système de diagnostic interactif des pannes des imprimantes [27].

Dans les chapitres qui vont suivre, nous faisons d'abord une introduction aux réseaux Bayésiens. Pour plus de détail, nous pouvons nous référer à [28]-[29]. Par la suite, nous évoquons un exemple classique de réseau Bayésien. Finalement, nous présentons leur application aux tableaux électriques avec les différentes étapes, de la construction à l'utilisation d'un réseau Bayésien.

## I. Les Réseaux Bayésiens

Les réseaux Bayésiens sont des graphes permettant à la fois de représenter des relations de causalités entre différentes variables (nœuds) et de faire des raisonnements probabilistes sur celles-ci à partir de calculs de probabilités conditionnelles.

Les relations causales sont matérialisées graphiquement par des arcs orientés entre les nœuds. Comme dans tout graphe causal nous avons une terminologie relative à la « famille ». Si A cause B, on dira que A est le parent de B ou B le fils de A.

Les relations causales ont par ailleurs un aspect quantitatif qui exprime la force du lien entre les variables. D'un point de vue probabiliste, si A cause B, il est naturel de considérer « la probabilité de B sachant A » qu'on note  $p(B/A)$ , comme force du lien entre A et B. Ainsi dans un réseau Bayésien, à chaque variable V avec  $P_1 \dots P_n$  comme parents, est associée une table de probabilités conditionnelles  $p(V/P_1, \dots P_n)$ . Pour les variables n'ayant pas de parents et représentées par les nœuds initiaux, on associe plutôt leurs probabilités a priori.

En résumé, un réseau Bayésien est un graphe dans lequel les nœuds représentent des variables aléatoires, et les liens des influences (entre variables) quantifiées par les tables de probabilités associées.

L'utilisation des réseaux Bayésiens, repose sur la propagation de l'information au sein du réseau, c'est-à-dire les calculs de probabilités a posteriori de certaines variables à partir d'un certain nombre

d'observations sur d'autres variables. Ces calculs sont fondamentalement basés sur la règle de Thomas Bayes (mathématicien britannique du XVIIe siècle).

$$P(B/A) = \frac{P(A/B) \cdot P(B)}{P(A)}$$

Cette règle, de par sa symétrie, permet de faire un raisonnement dans les deux sens, le calcul de la probabilité de B sachant A mais aussi de A sachant B. Dans un sens nous cherchons à expliquer une cause dans l'autre nous quantifions une conséquence.

Aujourd'hui, les algorithmes de calculs développés ne marchent que pour des réseaux ne comportant pas de circuit en boucle. A la construction du réseau Bayésien, une attention particulière doit donc être portée à ne pas introduire de boucle dans le réseau.

Les réseaux Bayésiens se servent aussi des propriétés des graphes pour limiter les calculs. Nous pouvons citer par exemple, la d-séparation, un critère graphique permettant pour tout groupe de variables de déterminer s'il y a ou non indépendance conditionnelle, simplifiant ainsi les calculs de probabilités [30].

L'essor des réseaux Bayésiens à fait naître une multitude de logiciels de modélisation parmi lesquels nous pouvons citer : Bayesia, Hugin, Netica et Genie2. Il existe aussi une toolbox Matlab (Bayes Net toolbox) [31] qui permet de créer des modèles de réseaux Bayésiens.

Dans la suite de cette étude nous présentons un exemple issu de la littérature [32]. Le réseau Bayésien mis en œuvre dans cet exemple a été modélisé à l'aide du logiciel Génie2.

## 1. Un exemple simple de réseau Bayésien

Ce matin-là, alors que le temps est clair et sec, M. Holmes sort de sa maison. Il s'aperçoit que la pelouse de son jardin est humide. Il se demande alors s'il a plu pendant la nuit, ou s'il a simplement oublié de débrancher son arroseur automatique. Il jette alors un coup d'œil à la pelouse de son voisin, M. Watson, et s'aperçoit qu'elle est humide. Il en déduit alors qu'il a probablement plu, et il décide de partir au travail sans vérifier.

Dans ce texte, monsieur Holmes fait un raisonnement qui peut être décrit à l'aide d'un Réseau Bayésien.

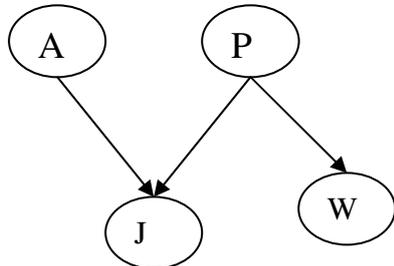
- L'herbe de mon jardin est mouillée (J) si et seulement si : il a plu cette nuit (P) ou j'ai oublié de débrancher mon arroseur (A). Ce qui se traduit par la table de probabilité ci-dessous et les liens  $A \rightarrow J$  et  $P \rightarrow J$ .

	A=vrai		A=faux	
	P=vrai	P=faux	P=vrai	P=faux
J=vrai	1	1	1	0
J=faux	0	0	0	1

- L'herbe du jardin de mon voisin Watson est humide (W) si et seulement si il a plu cette nuit. Ce qui se traduit par le lien  $P \rightarrow W$  et la table de probabilité associée.

	P=vrai	P=faux
W=vrai	1	0
W=faux	0	1

Cela conduit au graphe causal ci-dessous.



- A J'ai oublié de débrancher mon arroseur
- P Il a plu pendant cette nuit
- J L'herbe de mon jardin est humide
- W L'herbe du jardin de mon voisin Watson est humide

Pour compléter le modèle du réseau Bayésien nous devons définir pour les variables A et P les probabilités a priori. Supposons que Mr Holmes oublie assez souvent de débrancher son arroseur et que la région soit relativement pluvieuse. Nous pouvons donc poser :  $p(A) = 0.4$  et  $p(P) = 0.4$ . Le tableau suivant montre parallèlement les différentes étapes du raisonnement de Mr Holmes et les résultats qu'on aurait obtenus en raisonnant numériquement à l'aide d'un réseau Bayésien.

Raisonnement de Mr HOLME	Résultats numériques du modèle du réseau Bayésien

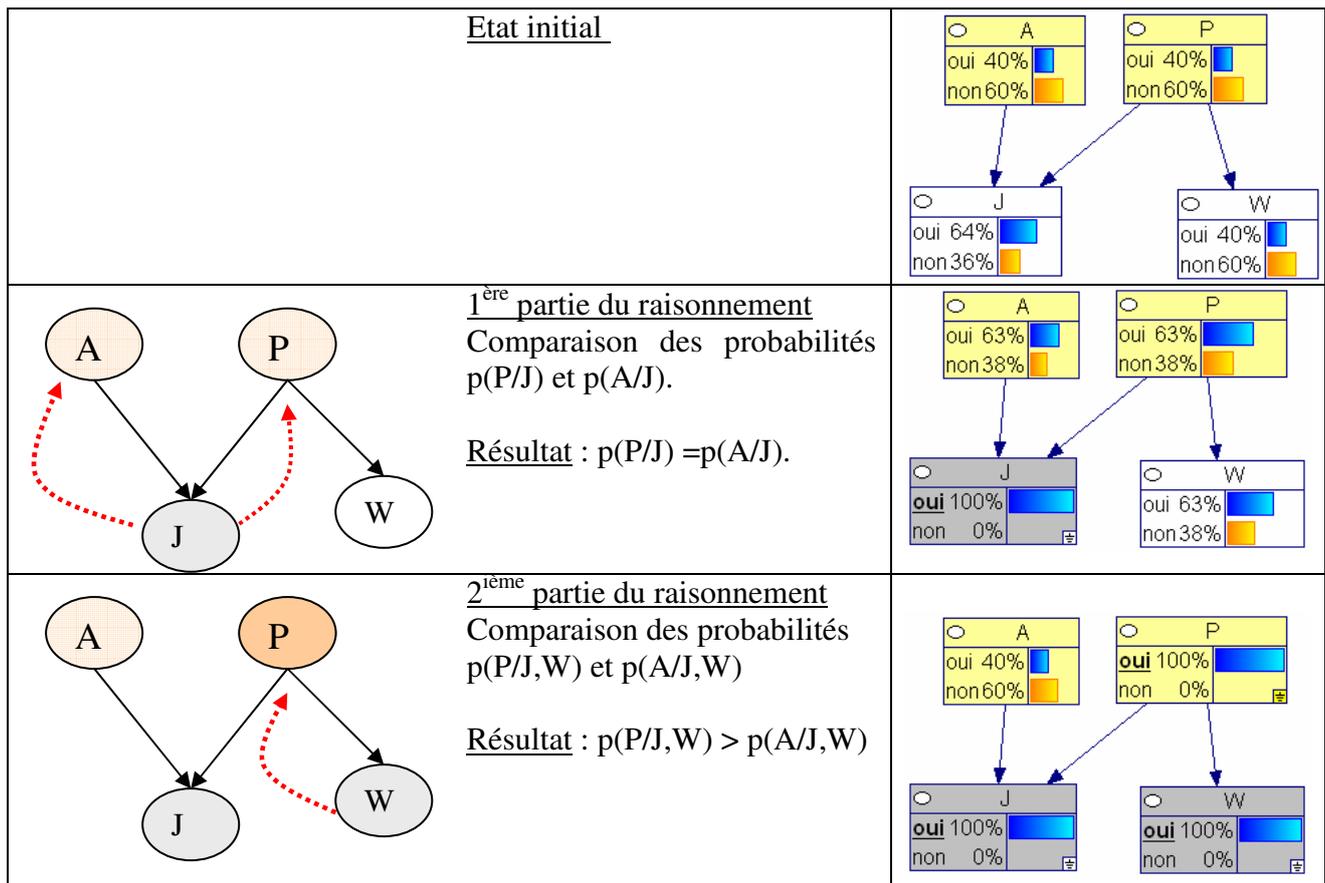


Figure 42 : Tableau de comparaison du raisonnement intuitif de Mr Holmes et des résultats du modèle du problème à partir d'un réseau Bayésien.

A l'étape 1 du raisonnement de Mr Holmes, la connaissance de J renforce la croyance en ces deux causes (A ou P) sans pouvoir les départager car J a la même influence sur A et P. D'un point de vue numérique, dans le réseau Bayésien associé, les probabilités sont augmentées de la même quantité.

A l'étape 2 du raisonnement de Mr Holmes, la connaissance supplémentaire de W permet de dégager la cause la plus probable. En effet, compte tenu du modèle adopté,  $p(P/V,W) = 1$ . La nouvelle information W donne la certitude qu'il a plu. Les calculs donnent par ailleurs  $p(A/V,W) = 0.4 = p(A/V)$ . Mr Holmes ayant la certitude qu'il a plu, il n'a aucune raison de modifier sa croyance a priori sur le fait que son arroseur est resté débranché.

Sur cet exemple relativement simple, nous arrivons à faire un raisonnement intuitif, et à obtenir la même conclusion que le réseau Bayésien, cependant ce type de raisonnement devient rapidement fastidieux voire impossible à l'échelle d'un graphe plus complexe. Nous avons dans ces cas recours à la puissance de calculs des réseaux Bayésiens.

Dans le chapitre suivant, nous donnons, les différentes étapes de la création d'un réseau Bayésien jusqu'à son utilisation sur notre cas d'application pour le diagnostic des tableaux électriques. Le réseau Bayésien mis en œuvre a été modélisé à l'aide du logiciel génie2.

## **II. La mise en œuvre du réseau Bayésien pour le diagnostic de l'armoire électrique**

L'Etat de la recherche sur les réseaux Bayésiens permet aujourd'hui une construction complète et automatique du réseau Bayésien associé à un système à partir d'une base de données de cas décrivant le comportement du système dans différentes situations. Cette base est alors utilisée non seulement pour établir la structure du réseau en identifiant les dépendances entre les différentes variables mises en jeu mais aussi pour le remplissage des tables de probabilités par une méthode d'apprentissage [33]-[34]. La plupart du temps, cette technique nécessite de grandes bases de données pour espérer avoir des résultats acceptables. Dans notre cas, ne disposant pas d'une telle base, nous ne pouvons donc utiliser cette technique afin de construire le réseau Bayésien et remplir les tables de probabilités associées. C'est pourquoi la construction du réseau Bayésien associé au tableau électrique pour son diagnostic, s'est faite « manuellement » en deux étapes :

- L'acquisition de connaissances (issues des experts et des sources documentaires) et la création du graphe.
- Le remplissage des tables de probabilités à l'aide des probabilités subjectives données par les experts.

### **1. Acquisition d'informations et création de graphe**

La première étape de la mise en œuvre du réseau Bayésien est l'acquisition des connaissances.

Elle passe par une recherche d'information qui s'est faite dans notre cas à travers les documents techniques complétés par les discussions avec les experts de Schneider-Electric.

## 1.1. Acquisition des informations

Plusieurs documents internes à Schneider-Electric traitent des causes de défaillances des tableaux électriques et de leurs effets. La lecture de ces documents nous a permis d'avoir une première idée des variables à prendre en compte et des liens de causalité entre ces variables [35]-[36]-[37].

Ci-dessous un exemple de document technique sur la thermique des tableaux électriques.

Causes	Effets	Protection
Température externe trop élevée	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Température interne tableau trop élevée</li> <li>■ Déclenchement des déclencheurs thermiques</li> <li>■ Vieillessement de l'électronique</li> <li>■ Température parois de l'enveloppe trop élevée</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Alarme</li> <li>■ Mise en route d'une ventilation</li> </ul>
Coefficient de foisonnement élevé. Dépassement des possibilités de l'installation	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Déclenchement de la protection de tête du tableau</li> <li>■ Température interne tableau trop élevée</li> <li>■ Température parois de l'enveloppe trop élevée</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Délestage</li> </ul>
Court circuit ou surcharge	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Détérioration des conducteurs</li> <li>■ Détérioration des supports de barres isolants</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Déclenchement de sécurité</li> </ul>
Mauvais serrage	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Destruction des conducteurs de l'appareillage</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Déclenchement amont aléatoire</li> </ul>
Section des conducteurs trop faible	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Destruction des conducteurs</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Aucune</li> </ul>
Erreur sur déclassement de l'appareillage ou mauvais positionnement	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Fonctionnement anormal (déclenchement)</li> <li>■ Vieillessement prématuré</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Déclenchement ou signalisation</li> </ul>

Figure 43 : Problème thermique en terme de causes/effets.

Sur la base des informations tirées de la recherche documentaire, nous avons engagé des discussions avec plusieurs experts. Ces discussions ont permis de recueillir d'autres informations. Dont les principales informations, au sens de la construction du réseau Bayésien, sont listées dans le chapitre suivant.

## 1.2. Principales informations recueillies.

Les principales informations recueillies concernent les variables qui constituent les nœuds du graphe. Dans un souci de clarté, nous les avons classées en trois catégories.

- les variables sommets,
- les variables intermédiaires,
- les variables terminales.

## Variables sommets

Ce sont les variables représentées par des nœuds sans aucun parent.

Age du tableau : comme on l'a vu précédemment, c'est un facteur significatif de dégradation des contacts.

Environnement poussiéreux: Les quantités de poussières qu'on trouve dans les tableaux mal protégés et installés dans des environnements poussiéreux peuvent engendrer la mauvaise transmission des ondes radio nécessaires pour véhiculer les données des capteurs sans fil. Dans ce type d'environnement, si le niveau de maintenance est mauvais, cela peut indirectement entraîner l'accélération de la dégradation des contacts.

Ambiance corrosive : L'ambiance corrosive dans ou à proximité immédiate de sites chimiques ou pollués, conduit à la corrosion des métaux : argent, aluminium ou cuivre. Elle peut entraîner la dégradation des contacts électriques en augmentant leur résistance électrique. Une ambiance corrosive conduit aussi à la dégradation des propriétés des matériaux servant d'isolants.

Niveaux de maintenance : Le maintien de la performance des tableaux électriques passe par une bonne maintenance. Un mauvais niveau de maintenance contribue d'avantage à la dégradation des contacts. L'impact de la maintenance est d'autant plus important lorsque nous sommes dans un environnement agressif (environnement poussiéreux ou corrosif par exemple).

Vibration : Les installations proches de machines vibrantes ou celles dans un environnement marin (bateau par exemple) sont des cas où le niveau de vibration peut entraîner non seulement un déclenchement intempestif des appareils de protection mais aussi contribuer à la dégradation des contacts électriques par desserrage progressif.

Température externe élevée : Une augmentation de la température extérieure entraîne automatiquement une augmentation de la température intérieure car la température interne résulte de la somme de la température extérieure et de l'échauffement des jeux de barres et appareils internes par effet joule. En général, les tableaux électriques basse tension sont conçus pour opérer dans une ambiance extérieure qui ne dépasse pas 40°C et où la moyenne de température sur une période de 24h n'excède pas 35°C [38].

Facteur de diversité : Le facteur de diversité assigné d'un tableau électrique ayant plusieurs circuits principaux est le rapport de la somme maximale, à n'importe quel instant, des courants présumés dans tous les circuits principaux considérés, à la somme des courants assignés de tous les circuits principaux du tableau (Cf. IEC-60439.1). Le constructeur définit donc les valeurs de facteurs de

diversité à ne pas dépasser. Le non respect des prescriptions du constructeur entraîne une élévation de la température interne du tableau.

Mauvaise ventilation : Des grilles d'aérations sont prévues dans la plupart des tableaux basse tension pour assurer leur refroidissement naturel. Certains tableaux ont même un ventilateur. Le mauvais fonctionnement de la ventilation ou son obstruction empêche le renouvellement de l'air, ce qui se manifeste par un échauffement supplémentaire de l'air interne du tableau.

Ambiance saline : Un environnement salin est susceptible d'entraîner un dépôt salin conducteur sur les isolants des appareils et jeux de barres, réduisant ainsi les caractéristiques d'isolation de ces derniers.

Mauvais serrage : Le mauvais serrage d'un contact électrique augmente sa résistance électrique et contribue à accélérer sa dégradation.

Visserie non conforme : De manière générale, avec une visserie non-conforme, il y a un risque de dégradation rapide du contact électrique.

Harmoniques : Les harmoniques contribuent à amplifier certains effets nuisibles aux réseaux électriques (effet de peau, effet de proximité, pertes fer, et courants de Foucault). Un taux d'harmonique inférieur à 30 % ne devrait pas avoir une influence notable sur l'équipement électrique. La présence d'harmoniques avec un taux supérieur à 30% entraîne un échauffement plus important que celui obtenu uniquement avec le fondamental. La présence d'harmoniques de rang 3 implique un échauffement du neutre.

Surcharges transitoires : Les surcharges transitoires, comme celles qui surviennent au démarrage de certains moteurs, ou celles fréquemment rencontrées dans les usines de fabrication de véhicule équipées de poinçonneuses, sont de nature à entraîner un phénomène de stress-relaxation au niveau des contacts électriques, ce qui peut causer leur dégradation à long terme. Elles ont par ailleurs un effet direct sur l'échauffement local des contacts électriques et peuvent entraîner le déclenchement intempestif des appareillages de protection.

## Variables intermédiaires

Les informations précédentes sur les nœuds initiaux nous ont permis d'identifier les nœuds intermédiaires, c'est-à-dire ceux avec au moins un nœud parent et un nœud fils.

Dégradation des contacts : La dégradation des contacts conduit à un échauffement créé par l'augmentation de sa résistance de contact.

Echauffement local anormal : L'échauffement anormal d'un conducteur ou d'un contact est un phénomène qui pourrait contribuer à l'élévation de la température interne du tableau. Il faudrait noter que l'échauffement des contacts est un phénomène plutôt local qui ne contribue pas beaucoup à l'échauffement de l'ambiante du tableau, mais plutôt à la dégradation des isolants qui sont sur (ou proches) du point chaud. L'échauffement anormal d'un contact est défini comme étant la différence de température entre le modèle jugé sain et les mesures faites directement sur ce dernier. Ce nœud fait le lien entre de diagnostic et la détection d'échauffement local anormal qui a fait l'objet de la partie précédente de notre étude.

Température interne élevée : Une température interne élevée a deux conséquences principales qui sont : le déclenchement intempestif des appareillages de protection et la dégradation des isolants due au stress thermique supplémentaire.

Dégradation d'isolant : La dégradation d'isolant entraîne la réduction des distances d'isolement.

Réduction des distances d'isolement : La réduction des distances d'isolement peut conduire à un incendie causé par un possible amorçage.

## Variables terminales

La description des nœuds précédents (nœuds sommets et intermédiaires) nous permet d'identifier les nœuds terminaux c'est-à-dire ceux sans aucuns nœud fils.

Risque d'amorçage : causé par une réduction de la distance d'isolement.

Déclenchements intempestifs : causés par les vibrations, les surcharges transitoires, les surcharges permanentes ou une température interne élevée.

Pertes de données radio : causées par un environnement poussiéreux

Echauffement du neutre : causé par un taux élevé d'harmonique de rang 3 (supérieur à 30%).

### **1.3. Construction du graphe**

En se basant sur les informations précédentes, tirées de la littérature et des discussions avec les experts de Schneider-Electric, une première version du graphe associé au réseau Bayésien a été construite et soumise aux experts. Ces derniers ont pu donc répondre à ces trois questions :

- Êtes-vous d'accord avec les liens entre les variables ?
- Y a-t-il des liens non représentés ?
- Y a-t-il d'autres variables non représentées ?



Dans un souci de simplification, toutes les variables intervenant dans ce réseau Bayésien sont considérées comme binaires. Nous nous plaçons ainsi à un niveau de diagnostic qui peut être qualifié de « dégrossissage ».

Le remplissage des tables de probabilités s'est fait au cours de séances de travail avec les experts qui ont donné, pour chaque variable, des estimations subjectives des probabilités conditionnelles.

La taille des tables de chaque nœud dépendant du nombre de leurs nœuds parents, nous avons eu recours à l'hypothèse noisy-or, pour des nœuds ayant un nombre élevé de parents, comme le suggère Finn V. Jensen [39]. Cette hypothèse permet de réduire le nombre de paramètres nécessaires au remplissage des tables. Par exemple pour un nœud représentant une variable binaire avec 7 parents, il serait nécessaire à l'expert d'estimer  $2^7 = 128$  probabilités. C'est rapidement ennuyeux et surtout irréaliste.

L'hypothèse de la variable noisy-or est basée sur le raisonnement suivant :

Considérons une variable binaire  $Y$  avec  $X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_n$  comme parents :

- Si nous connaissons les probabilités  $p_i$ , que  $X_i$  cause  $Y$  lorsque les autres variables  $X_j$  sont absentes (  $p(Y = 1 / X_i = 1, X_j = 0 \forall j \neq i)$  ).
- Si nous faisons l'hypothèse que les évènements «  $X_i$  cause  $Y$  » sont indépendants des évènements «  $X_j$  cause  $Y$  » pour tout  $X_i, X_j$  parents de  $Y$ .

Alors, sous l'hypothèse noisy-or, le calcul des probabilités conditionnelles du nœud  $Y$  lorsque plusieurs des  $X_i$  sont présents se traduit par :

$$p(Y / X) = 1 - \prod_{i / X_i \in X_p} (1 - p_i) \quad (1)$$

Où  $X_p$  est l'ensemble des  $X_i$  vrais. Ainsi pour un nœud  $Y$  avec  $n$  parents  $X_1, \dots, X_n$ , l'hypothèse noisy-or conduit à ne spécifier que les  $n$  probabilités  $p_i$  au lieu de  $2^n$  pour remplir complètement la table de probabilités (le reste des combinaisons étant calculées à l'aide de la formule (1)).

Cette formule pourrait s'expliquer en prenant l'exemple d'un OU logique. En effet selon l'algèbre de BOOLE, si  $C$  est causé par  $A$  ou par  $B$ , cela se traduit par :

$$C = A + B$$

Ou encore,

$$\overline{C} = \overline{A + B} = \overline{A} \bullet \overline{B}$$

Ainsi en traduisant cette dernière formule dans le domaine des probabilités il vient : Si  $A$  et  $B$  sont indépendants,

$$p(\bar{C}) = p(\bar{A} \bullet \bar{B}) = p(\bar{A}) \cdot p(\bar{B})$$

En faisant  $p(\bar{A}) = 1 - p(A)$  de même pour C et B. il s'en suit :

$$p(C) = 1 - [1 - p(A)] \cdot [1 - p(B)]$$

La formule (1) semble être la généralisation de ce résultat.

Dans notre cas, de manière générale, l'hypothèse noisy-or a été prise pour des nœuds ayant un nombre de parents supérieur à 3.

Après plusieurs discussions avec les experts, il ne fait aucun doute qu'il est plus facile pour eux de raisonner à partir d'indications verbales plutôt que directement sur des probabilités numériques. Ainsi l'échelle ci-dessous a été utilisée pour faire correspondre des probabilités numériques à ces indications verbales.

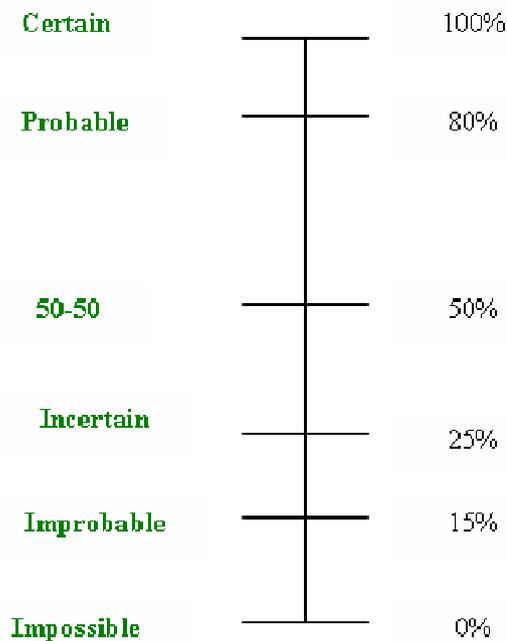


Figure 45 : Correspondance Indications verbales/ Probabilités.

L'annexe 6 donne la liste complète des tables de probabilités conditionnelles ainsi obtenues. En ce qui concerne les probabilités a priori des nœuds sommets, elles dépendent de l'environnement de fonctionnement du tableau électrique. Par exemple pour un tableau installé sur un site près de la mer, la probabilité a priori de la variable « environnement salin » devrait être plus élevée que s'il n'y était pas. N'ayant aucune indication à ce stade sur ces variables sommets, elles ont toutes été initialisées dans un premier temps avec une valeur de 0.5.

Avant l'utilisation proprement dite du réseau Bayésien, il est nécessaire de le tester pour vérifier qu'il ne donne pas de conclusions aberrantes. C'est l'objet du chapitre suivant.

# III. Evaluation et utilisation du réseau Bayésien

## 1. Evaluation

Une méthode pratique d'évaluation d'un réseau Bayésien est de le tester sur des exemples triviaux ou issus de bases de données de cas réels [40].

Cette méthode consiste à estimer la probabilité de nœuds spécifiques étant données les observations faites sur certains d'entre eux et de comparer le résultat à celui escompté.

Dans notre étude, la plupart des cas réels de défaillances à notre disposition concernent des cas d'échauffements anormaux détectés par exemple durant les inspections périodiques par thermographie infrarouge. Cette difficulté à avoir une base de données de cas très variés, exploitables pour cette évaluation, s'explique par le fait qu'il n'y avait au préalable pas de politique d'enregistrement de cas de défaillances en vue d'une telle capitalisation de connaissances pour le diagnostic.

Chaque fois qu'un échauffement anormal est détecté, les experts essaient de l'expliquer par les variables décrivant l'environnement ou les conditions de fonctionnement.

Ils utilisent les indications disponibles et ne font pas forcément la mesure de l'état de chacune des variables apparaissant dans le réseau Bayésien avant de tirer leur conclusion. Ainsi, tous les cas tests en notre disposition ont des valeurs manquantes. Cependant, cela ne devrait pas poser de problèmes majeurs dans l'évaluation car les réseaux Bayésiens sont robustes à ce type de problème, dans la mesure où les probabilités sont propagées seulement en tenant compte des nœuds dont l'état est connu.

Nous avons donc testé la capacité du réseau Bayésien que nous avons construit à prédire la variable « échauffement anormal » sur les 14 cas dont nous disposons (Figure 46). De par sa position centrale dans le réseau, le nœud « échauffement anormal » s'avère intéressant à tester, car il a une interaction avec un grand nombre d'autres nœuds.

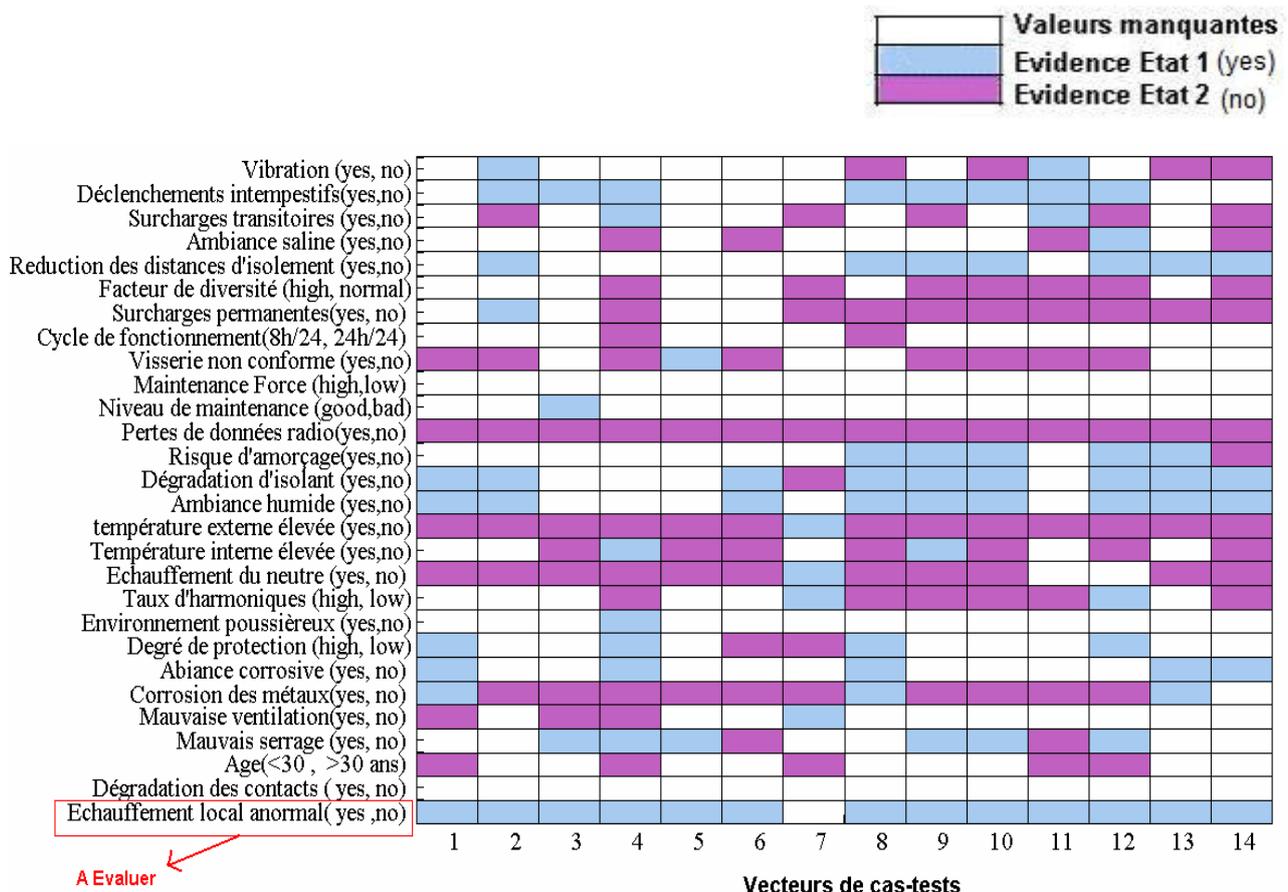


Figure 46 : Vecteurs tests avec des données manquantes.

Pour cette évaluation, nous prenons comme probabilités a priori des nœuds sommets la valeur intermédiaire 0.5, lorsque nous n'avons aucune information sur ces variables.

L'évaluation consiste, pour chaque cas test, à fixer dans le réseau l'ensemble des variables dont nous connaissons les valeurs (évidence) à l'exception de la variable « échauffement anormal » qui est à évaluer. Puis à l'aide du réseau Bayésien, nous estimons la probabilité

$p(\text{Echauffement local anormal}=\text{vrai}/\text{évidence})$  que nous comparons à l'état réel de cette variable.

Les résultats sont présentés à la Figure 47 sur laquelle nous constatons que 12 des 14 cas tests ont une probabilité  $p(\text{échauffement anormal}=\text{vrai}/\text{évidence}) \geq 0.8$  alors que la valeur escomptée était de 1. Ce qui est un résultat positif et très encourageant.

Comme nous pouvons le voir, cette méthode loin d'être exhaustive, permet de manière pratique de se faire une bonne idée de la capacité du réseau Bayésien à estimer le bon résultat sur des cas connus. En effet nous comptons sur la capacité du réseau Bayésien à s'adapter par un processus d'apprentissage (développé dans le chapitre suivant #3), pour améliorer sa précision au fil du temps.

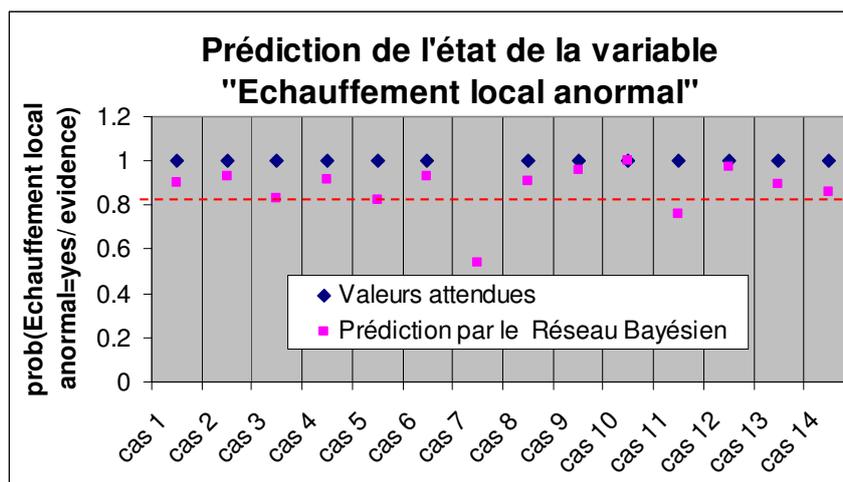


Figure 47 : Résultat du test d'évaluation du réseau Bayésien.

Après la phase de test vient celle d'utilisation. Le chapitre suivant traite d'exemples d'utilisation pratique des réseaux Bayésiens pour le diagnostic et pour l'analyse prédictive de risque.

## 2. Utilisation du réseau Bayésien

Dans cette phase d'utilisation, nous pouvons interroger le réseau Bayésien de deux manières :

- Nous constatons que le système est défaillant, nous connaissons les manifestations de cette défaillance et nous voulons connaître les causes de défaillance. C'est l'analyse pour le diagnostic.
- Nous ne constatons pas une défaillance de notre système, mais nous voulons connaître les risques de défaillances compte tenu de l'environnement du système et de l'utilisation qui en est faite. C'est l'analyse prédictive de risque.

Dans les cas d'application qui vont suivre, les variables ont été respectivement numérotés 1, 2 et 3 pour les variables sommets, intermédiaires et terminales.

### 2.1. Analyse de diagnostic

Le diagnostic, comme explication des causes de défaillances par les observations, consiste en une remontée d'informations dans le réseau Bayésien. C'est à dire que le graphe est parcouru dans le sens des effets vers les causes. Les variables du réseau Bayésien sont divisées en deux familles :

- Une famille de variables observées, c'est-à-dire celles dont l'état connu est imposé au réseau. Dans notre cas d'étude, nous pouvons choisir comme variables observées par

exemple les nœuds « échauffement anormal », « Corrosion de métal », « Température interne élevée », « dégradation d'isolant », « dégradation de contact ».

- Une famille de variables d'explications. Ce sont celles qui sont évaluées par le réseau et hiérarchisées dans le but de déterminer les causes des observations faites sur les variables observées. La Figure 48 donne un exemple d'analyse de diagnostic faite en deux étapes.

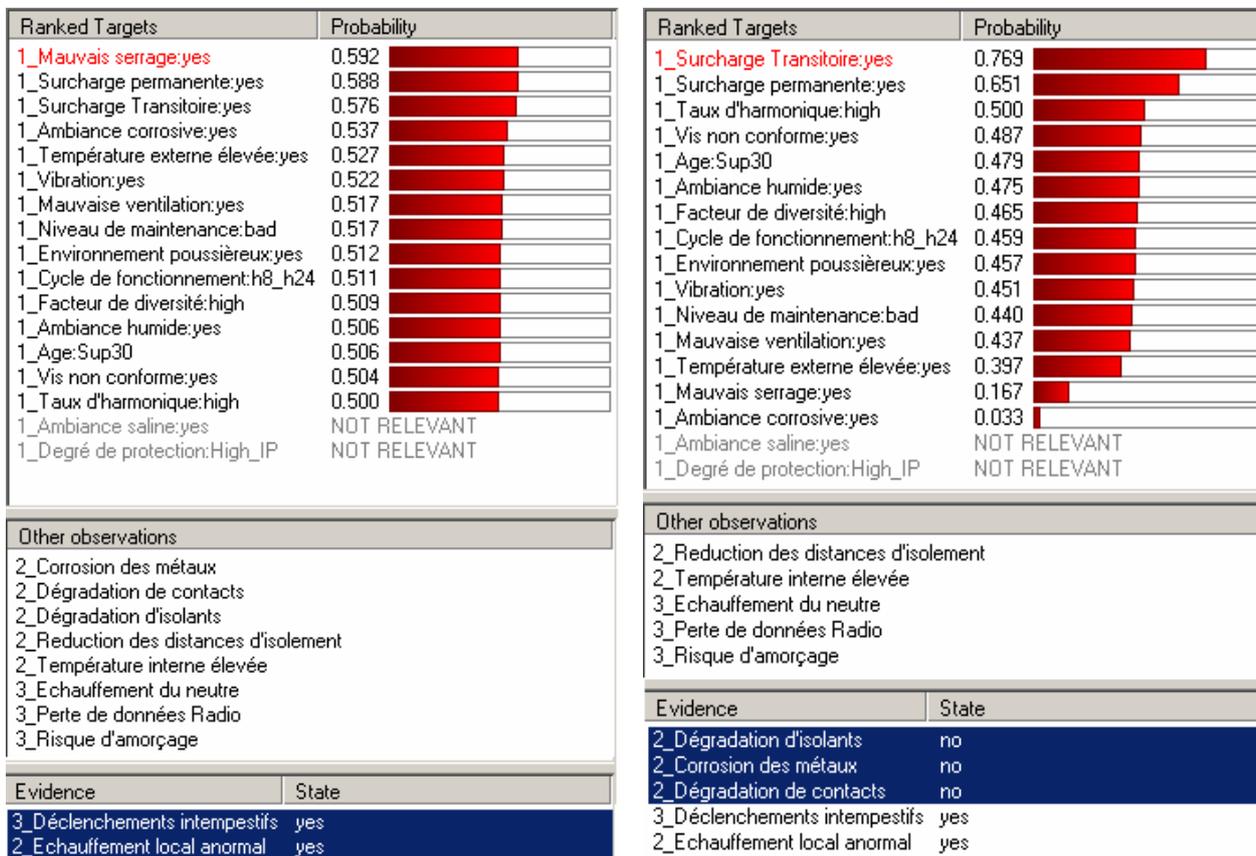


Figure 48 : Exemple d'analyse de diagnostic en deux étapes.

Il illustre le cas où le client observe un « échauffement anormal » et un « déclenchement intempestif ». Il voudrait en connaître les causes. Le réseau Bayésien est alors interrogé dans le sens des effets vers les causes. Cela conduit au résultat sur La Figure 48 (partie gauche) où nous pouvons noter que la cause la plus probable est « le mauvais serrage ».

Considérons maintenant qu'une nouvelle inspection du tableau faite par le client, guidé par la première analyse, révèle qu'il n'y a pas « corrosion de métal », ni de marque de « dégradation d'isolant », ni de « dégradation de contact ». Avec ces nouvelles informations dont il dispose, les causes les plus probables deviennent, « les surcharges transitoires » et les « surcharges permanentes ». Les variables « mauvais serrage » et « ambiante corrosive » ne sont plus des causes très probables, compte tenu des nouvelles observations Figure 48 (partie droite).

La Figure 49 résume bien le processus d'analyse pour le diagnostic où, comme dans l'exemple précédent, des mesures complémentaires peuvent être faites pour affiner le diagnostic dont les conclusions devraient dicter une stratégie de maintenance.

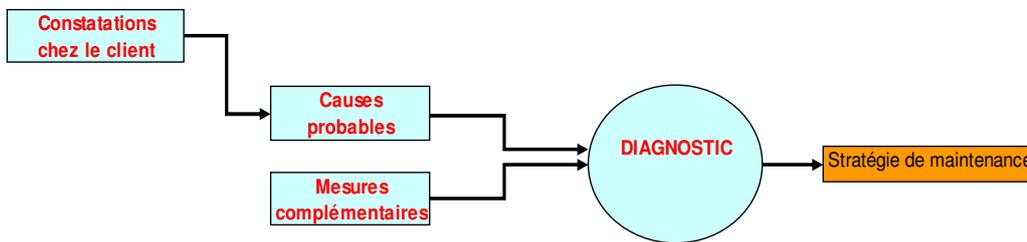


Figure 49 : Remontée du réseau Bayésien, Diagnostic.

## 2.2. Analyse prédictive de risques

Dans le cas où le client exploitant du tableau électrique voudrait connaître les risques de défaillances compte tenu de l'environnement et des conditions de fonctionnement, le réseau Bayésien peut être utilisé à cet effet. Il s'agit d'une descente du réseau, c'est-à-dire que le graphe est parcouru des causes vers les effets.

L'analyse de risques se fait en définissant :

- D'une part les variables cibles, celles dont nous voulons surveiller le risque d'apparition.
- Et d'autre part, les variables « d'observation » qui sont utilisées pour décrire l'environnement et les conditions d'utilisation du système.

Dans notre cas les cibles peuvent être les variables « déclenchement intempestif », « dégradation des contacts », « risque d'amorçage », « température intérieure élevée », « échauffement du neutre ».

Dans un premier temps, le réseau Bayésien, interrogé avec les conditions de fonctionnement décrites Figure 50 (partie gauche), avec une ventilation correcte, indique que le risque le plus probable dans ce cas est « la dégradation de contact ». La forte valeur relative de la probabilité d'apparition de « dégradation de contact » est liée au fait que pour ce test, les probabilités a priori de toutes les variables sommets ont été définies égales à 0.5 ce qui est une valeur assez élevée.

Ranked Targets	Probability
2_Dégradation de contacts:yes	0.531
2_Dégradation d'isolants:yes	0.269
2_Reduction de distance d'isolement:yes	0.108
3_Risques d'amorçage:yes	0.106
3_Déclenchements intempestifs:yes	0.099
2_Température interne élevée:yes	0.074
3_Echauffement du neutre:yes	0.010

Other observations
1_Mauvais serrage
1_Vis non conforme
2_Corrosion des métaux
2_Echauffement local anormal
3_Pertes de données radio

Evidence	State
1_Age	Inf30
1_Mauvaise ventilation	no
1_Facteur de diversité	normal
1_Ambiance corrosive	no
1_Degré de protection	High_IP
1_Environnement poussiéreux	no
1_Taux d'harmoniques	normal
1_Température externe élevée	no
1_Ambiance humide	no
1_Niveau de maintenance	good
1_Cycle de fonctionnement	h8_h24
1_Surcharges permanentes	no
1_Ambiance saline	no
1_Surcharges transitoires	no
1_Vibrations	no

Ranked Targets	Probability
2_Température interne élevée:yes	0.768
3_Déclenchements intempestifs:yes	0.561
2_Dégradation de contacts:yes	0.531
2_Dégradation d'isolants:yes	0.407
2_Reduction de distance d'isolement:yes	0.163
3_Risques d'amorçage:yes	0.155
3_Echauffement du neutre:yes	0.010

Other observations
1_Mauvais serrage
1_Vis non conforme
2_Corrosion des métaux
2_Echauffement local anormal
3_Pertes de données radio

Evidence	State
1_Age	Inf30
1_Mauvaise ventilation	yes
1_Facteur de diversité	normal
1_Ambiance corrosive	no
1_Degré de protection	High_IP
1_Environnement poussiéreux	no
1_Taux d'harmoniques	normal
1_Température externe élevée	no
1_Ambiance humide	no
1_Niveau de maintenance	good
1_Cycle de fonctionnement	h8_h24
1_Surcharges permanentes	no
1_Ambiance saline	no
1_Surcharges transitoires	no
1_Vibrations	no

Figure 50 : Exemple d'analyse prédictive de risque en deux étapes.

Dans un deuxième temps, supposons que le client constate que son système de ventilation ne fonctionne plus. Nous constatons les variations de probabilités introduites sur les variables cibles par cette nouvelle évidence Figure 50 (partie droite). Dans ce nouveau cas, le risque le plus probable devient « température interne élevée » suivi de « déclenchement intempestif ». Pour éliminer ce risque, le client devrait améliorer l'état de son système de ventilation.

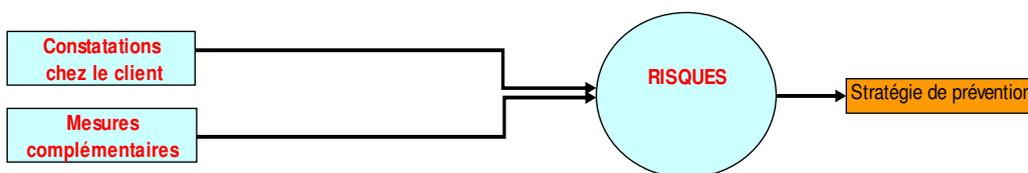


Figure 51 : Descente du graphe du réseau Bayésien, Analyse de risque.

Ainsi à travers cet exemple, nous voyons que le réseau Bayésien peut être utilisé pour une analyse de risques en vue de définir une stratégie de prévention. Pour affiner les conclusions de cette analyse, des mesures complémentaires peuvent également être faites. Le principe de l'analyse de risque est résumé à la Figure 51.

## Remarques

Que ce soit pour diagnostiquer les causes d'un incident ou pour prévenir un risque, à partir des observations on impose certaines variables du réseau, qui recalcule les probabilités des variables non observées en conséquence (règle de Bayes). Certaine fois il est nécessaire de faire des mesures supplémentaires pour affiner les conclusions. Le choix des variables supplémentaires à mesurer est guidé par les premières conclusions, par la disponibilité des informations et le coût de la mesure.

### **3. Adaptation automatique des probabilités des réseaux Bayésiens par un processus d'apprentissage**

Dans de nombreux cas réels, à la construction d'un réseau Bayésien, il n'existe pas ou très peu de données. Ainsi, le remplissage des tables de probabilités conditionnelles se fait par les experts du domaine. Par ailleurs, il n'est pas toujours possible de vérifier la fiabilité de ces informations.

Par exemple, nous rencontrons souvent le cas où l'expert concepteur d'un système tend à surestimer les capacités du système qu'il a conçu.

Lorsque l'estimation des probabilités conditionnelles est faite par plusieurs experts, il peut aussi arriver qu'il y ait désaccord entre ces derniers.

Ce sont autant de facteurs susceptibles de biaiser les valeurs de probabilités initialement données par les experts.

Il est donc capital de construire un système qui adapte automatiquement les paramètres du réseau à partir des données disponibles au fil du temps, ce qui permet de remplacer à long terme les probabilités subjectives données par les experts au profit de celles issues du traitement statistique de l'information issue du retour d'expérience. C'est un problème d'apprentissage des paramètres d'un réseau de structure fixée.

#### **3.1. L'apprentissage de paramètres**

L'apprentissage de paramètres d'un réseau Bayésien consiste à calculer le meilleur jeu de probabilités conditionnelles utilisées dans le graphe, qui permette de rendre compte des données réelles observées. Il existe plusieurs techniques selon la disponibilité des données. Nous exposons ici les plus connues.

Dans le cas où toutes les variables sont observées (données complètes), l'un des moyens le plus simple d'estimer les probabilités est l'apprentissage statistique. Il s'agit de calculer la probabilité de

chaque évènement comme étant la fréquence d'apparition de cet évènement dans l'ensemble de la base de données. C'est une approche basée sur le maximum de vraisemblance.

Il existe un autre moyen, l'apprentissage Bayésien, quelque peu différent de l'apprentissage statistique. Le principe est de trouver les paramètres les plus probables compte tenu des observations qui ont été faites. C'est une approche basée sur le calcul du maximum a posteriori.

En réalité, dans la plupart des problèmes, certaines variables sont non observées. Les bases de données sont donc incomplètes. Dans ces cas, l'algorithme itératif Expectation-Maximisation (EM) peut être utilisé pour estimer les paramètres manquants de façon à ce que les méthodes précédentes soient applicables à chaque pas d'itération jusqu'à la convergence [41].

### 3.2. La base de données

L'apprentissage s'appuiera sur une base de données de cas réels qui s'enrichira chaque fois que des cas de diagnostic seront rencontrés et enregistrés dans cette base.

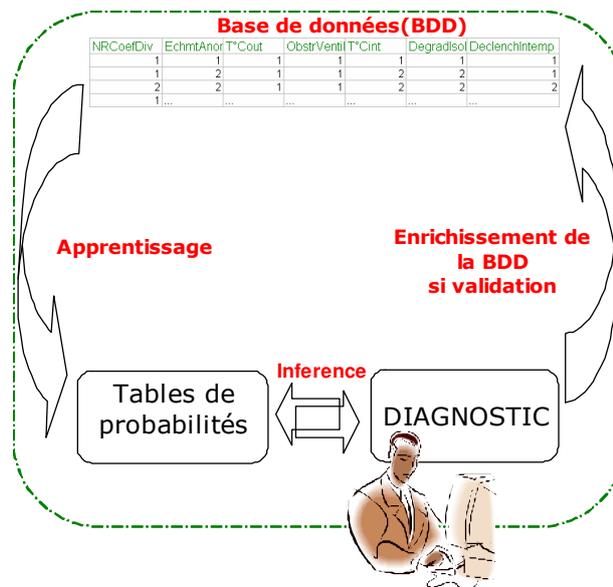


Figure 52 : Processus d'enrichissement de la base de données d'apprentissage.

Dans notre étude, l'outil internet permet de partager une base de données centralisée qui contiendra tous les cas survenus sur l'ensemble des systèmes en exploitation et dont la cohérence et la logique auront au préalable été validées par les experts (Figure 52).

En ce qui concerne la confiance portée au diagnostic de l'expert, la plupart des logiciels de réseaux Bayésiens permettent de prendre en compte cet aspect en donnant la possibilité de mettre un poids plus ou moins important à chaque cas enregistré dans la base de données, selon le degré de certitude sur le diagnostic posé.

Enfin, dans l'utilisation pratique, l'apprentissage pourrait être fait, selon les cas, sur une partie de la base de données dans le but d'être plus précis. Par exemple, pour un diagnostic sur une marque particulière de tableaux électriques, l'apprentissage pourrait se faire à partir uniquement des cas rencontrés sur les tableaux de la même marque.

Ces derniers points ont très peu été abordés durant cette thèse, ce sont donc des pistes qui constituent autant de perspectives pour la suite du travail.

# CONCLUSION

Dans cette partie, nous avons proposé une méthode de diagnostic du tableau électrique qui répond à deux objectifs :

- Le premier objectif est de pouvoir identifier les causes réelles de défaillance pour pouvoir les éliminer le plus rapidement possible, réduisant ainsi les coûts liés à la maintenance corrective proprement dite et à l'arrêt de l'équipement.
- Le deuxième est de pouvoir prévenir le tableau électrique des risques de défauts avant même que ceux-ci n'apparaissent, permettant d'éviter des temps d'arrêts imprévus de l'équipement et d'anticiper des maintenances lorsque nécessaire.

La méthode de diagnostic proposée est basée sur la technique des réseaux Bayésiens qui permet avec le même modèle de répondre à ces deux objectifs.

A travers l'exemple du réseau Bayésien pour le diagnostic des tableaux électriques, nous montrons les différentes étapes, de sa construction, qui inclut l'acquisition des informations auprès des experts, jusqu'à son utilisation.

Ce réseau fait intervenir à la fois des paramètres locaux tels que « échauffement local anormal » et globaux tels que ceux liés à l'environnement de fonctionnement (ambiance saline, ambiance poussiéreuse).

En ce qui concerne l'évaluation du réseau Bayésien, le manque d'une grande base de données de cas tests ne nous a pas permis de faire une évaluation exhaustive. Cependant, les tests qui ont été faits sur quelques cas réels à notre disposition, ont donné des résultats satisfaisants.

Par ailleurs, la précision des conclusions du réseau Bayésien devrait s'améliorer avec la possibilité d'adaptation automatique du réseau. Cette adaptation faite par un processus d'apprentissage au fil des interventions sur les équipements permet de pouvoir remplacer à long terme, les probabilités subjectives des experts par des probabilités issues d'un traitement statistique des données.



## Chapitre6

# LE SYSTEME COMPLET : EXEMPLE D'APPLICATION

---



# LE SYSTEME COMPLET : EXEMPLE D'APPLICATION

## Introduction

Dans les chapitres précédents, nous avons détaillé les différents éléments du système de détection et de diagnostic de défaut des armoires électriques.

Le but de ce chapitre est de présenter l'état actuel du système de détection et de diagnostic de défaut dans sa globalité, sur un exemple concret.

# I. Tableau OKKEN en condition réelle d'utilisation.

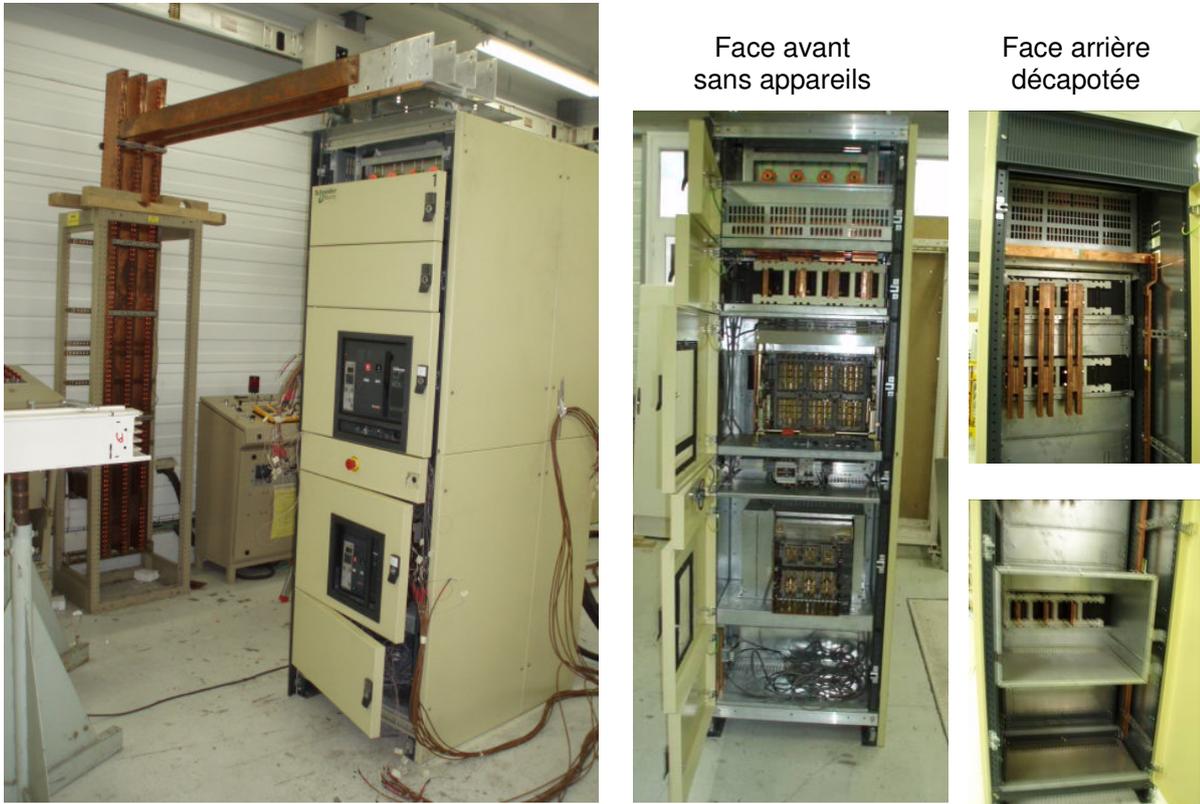


Figure 53 : Essais sur le tableau électrique OKKEN.

Le tableau OKKEN est une configuration typique de tableau électrique basse tension de forte puissance. Le tableau de la Figure 53 est composé de deux disjoncteurs :

- Un disjoncteur d'arrivée (Masterpact NW 32), pouvant véhiculer jusqu'à 3200A de courant.
- Un disjoncteur de départ (Masterpact NT 16), pouvant véhiculer jusqu'à 1600A de courant.

Ces deux disjoncteurs triphasés sont reliés par un circuit de jeux de barres en cuivre comme indiqué sur le schéma de la Figure 54. Ils sont donc obligatoirement traversés par le même courant car il n'y a aucune dérivation de circuit entre eux. Ainsi, le courant qui peut traverser ce tableau dans cette configuration est limité au courant maximum du disjoncteur NT c'est à dire 1600A.

Ce tableau a un degré de protection (contre les contacts avec des parties actives, contre la pénétration de corps étrangers solides et liquides) élevé. D'où un indice de protection fort ( $IP > 3$ ).

C'est un tableau qui avait moins d'une année d'utilisation au moment des tests.

## II. Positionnement des capteurs

Selon le principe de la matrice de priorités présentée au chapitre 3, les contacts de ce tableau électrique, pourront être instrumentés dans l'ordre de priorité ci-dessous, afin de mesurer leur température.

- Les pinces d'embrochages du disjoncteur d'arrivée NW32 (Figure 54 contacts 3, 4).
- Les pinces d'embrochages du disjoncteur de départ NT16 (Figure 54 contacts 7, 8).
- Les contacts boulonnés des connexions clients (Figure 54 contacts 9).
- Les contacts boulonnés près d'isolants (Figure 54 contacts 5, 6).
- Les contacts boulonnés de jeux de barres nues (Figure 54 contacts 1, 2).

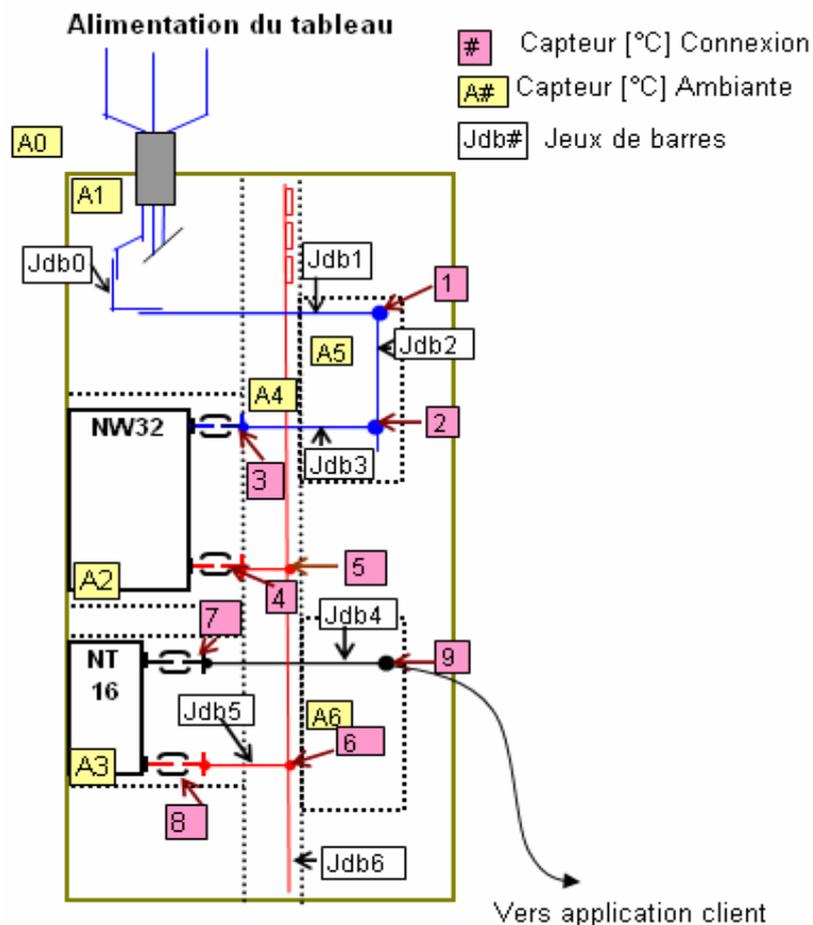


Figure 54 : Schéma du montage du tableau okken.

Les températures ambiantes des différents compartiments et celle de l'extérieur doivent également être mesurées. En effet elles constituent des entrées du modèle thermique pour la détection de

défauts. Les points de mesures des températures ambiantes sont repérés de A0 à A5 sur la Figure 54. En ce qui concerne la mesure des courants, elle se fait à l'aide des capteurs de courant intégrés aux disjoncteurs. Ce schéma filaire, ne montre qu'une seule des trois phases du tableau.

## III. Modélisation et Détection

### 1. Modélisation

Deux techniques de détection de l'échauffement anormal d'un contact électrique ont été présentées dans le chapitre 4 de ce document à savoir :

- La détection par modélisation mathématique via les réseaux de neurones.
- La détection par modélisation physique via le logiciel EchaufWeb.

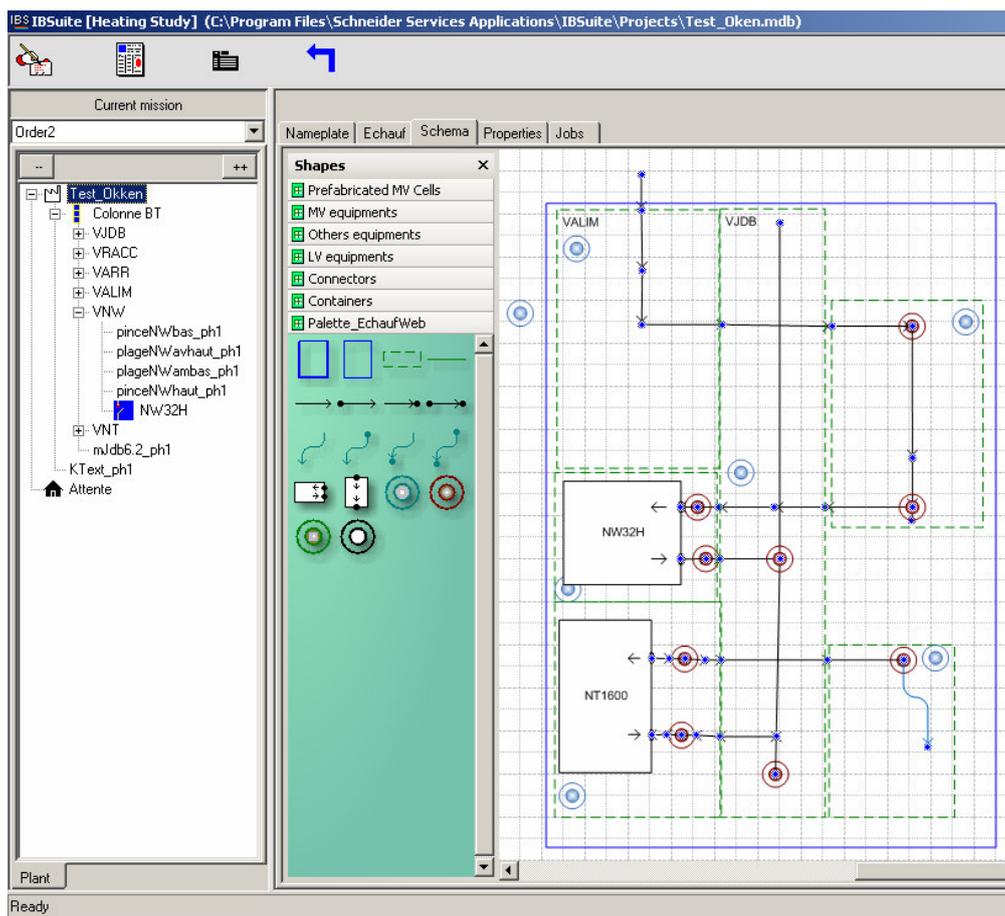


Figure 55 : Modélisation EchaufWeb du tableau électrique en essai.

Pour la détection de défaut sur le tableau faisant l'objet de notre étude dans ce chapitre, nous avons choisi la méthode par modélisation physique. La Figure 55 représente un écran du logiciel montrant le schéma du modèle, les points de connexions, les disjoncteurs et les différents compartiments du tableau.

Nous avons également vu que pour réduire l'écart entre le modèle et les mesures réelles il est nécessaire de passer par une phase de calage du modèle sur des valeurs issues de ces mesures. Cette opération s'est faite en modifiant la valeur de certains paramètres, le tableau étant alimenté avec un courant de 1000A. Nous pouvons distinguer trois types de paramètres (Figure 56-Figure 57-Figure 58)

- *Les paramètres dont la valeur exacte est connue.* Ce sont par exemple les dimensions de jeux de barres lues dans le plan associé au tableau (Jdb1 à Jdb6 sur le schéma de la Figure 54). Ils ne sont normalement pas utilisés pour le calage.

**Erreur ! Liaison incorrecte. Erreur ! Liaison incorrecte.**

Figure 56: Variation de paramètres avant et après calage (1).

- *Les paramètres estimés par une mesure approximative* (dimension de certains jeux de barres : exemple jdb0) ou par mesures sur d'autres équipements (résistances électriques et thermiques). Ils sont utilisés pour le calage ; cependant leur variation se fait dans des plages connues.

**Erreur ! Liaison incorrecte. Erreur ! Liaison incorrecte.**

Figure 57 : Variation de paramètres avant et après calage (2).

- *Les paramètres empiriques*, dont on ne connaît normalement pas la valeur. Ils sont initialisés en utilisant des tables (voir annexe 7) ou des règles de calculs. Leurs valeurs finales (après calage) peuvent beaucoup différer des valeurs initiales (avant calage). Nous pouvons citer dans cette catégorie les périmètres d'échanges et les paramètres d'ajustement des coefficients d'échanges calculés par le programme.

**Erreur ! Liaison incorrecte.**

Figure 58 : Variation de paramètres avant et après calage (3).

Ces paramètres représentent autant de degré de liberté dans le processus de calage, car ils agissent différemment sur le profil de températures. En effet, la résistance électrique de contact a un effet local de translation vertical du profil de température, tandis que les périmètres et coefficients

d'échanges permettent de faire une translation verticale beaucoup plus globale. La résistance thermique modifie localement la pente du gradient de température, etc.

La Figure 59 nous donne la comparaison des résultats avant et après calage sur les différents points de mesures (connexions sur la phase 1). Nous pouvons voir qu'avant le calage le profil de température ressemblait déjà au profil après calage.

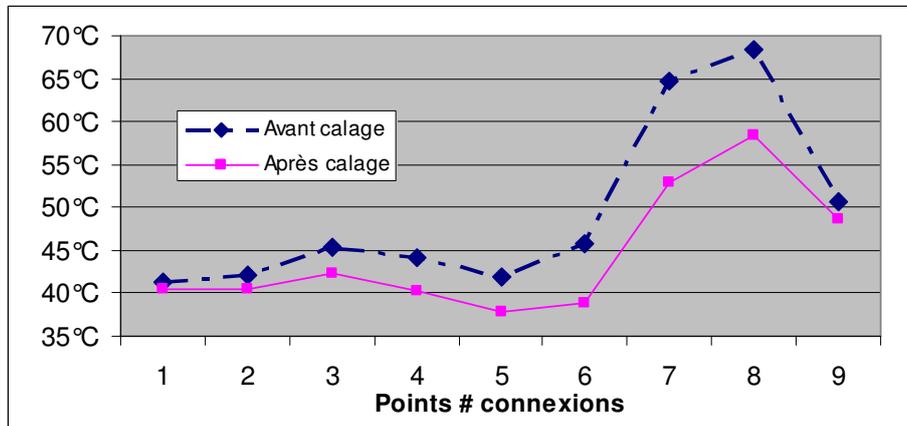


Figure 59 : Comparaison des résultats du modèle EchaufWeb avant et après la phase de calage.

La Figure 60 est la comparaison des températures calculées et celles mesurées sur la phase 1 du tableau après stabilisation des températures (après environ 4h 30 d'essai).

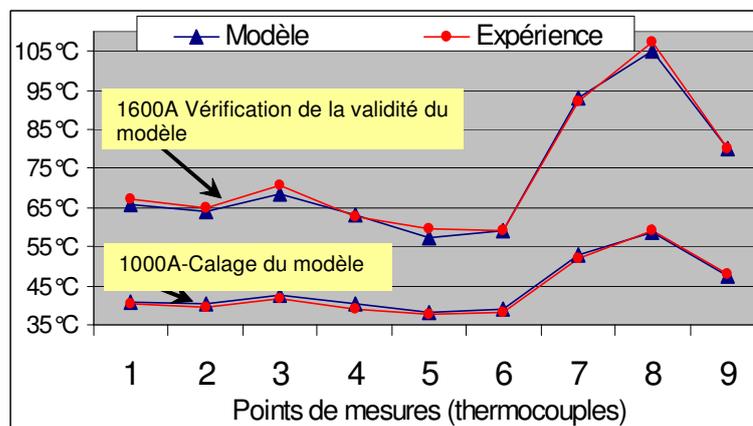


Figure 60 : Résultats du modèle du tableau phase de calage du modèle et validation.

Nous pouvons remarquer que ces températures sont très proches. L'erreur relative moyenne entre le modèle et l'expérience est de 1%.

Afin de vérifier la validité du modèle, la même comparaison a été faite avec le tableau électrique alimenté par un courant de 1600A. Le modèle EchaufWeb a alors été lancé sans aucun changement sur les valeurs des paramètres d'entrées, à part le courant qui est passé de 1000A à 1600A. Les résultats de cette comparaison sont représentés également sur la Figure 60.

Pour ce point de fonctionnement (1600A) l'erreur moyenne relative entre le modèle et l'expérience est passée à 2% avec un maximum de 4% sur le point 5. D'après ces résultats, le modèle peut être considéré comme valide.

Le modèle peut donc être utilisé comme une référence valide pour la détection d'échauffements anormaux des contacts.

## 2. Détection

Dans ce chapitre, nous utilisons le modèle précédent pour détecter un état d'échauffement anormal. Pour ce faire, nous créons un défaut de desserrage sur la connexion client repérée 9 sur le schéma de la Figure 54. Ce contact a subi un desserrage jusqu'à 1/8<sup>ième</sup> de son couple nominal. Le tableau est alimenté avec un courant de 1000A.

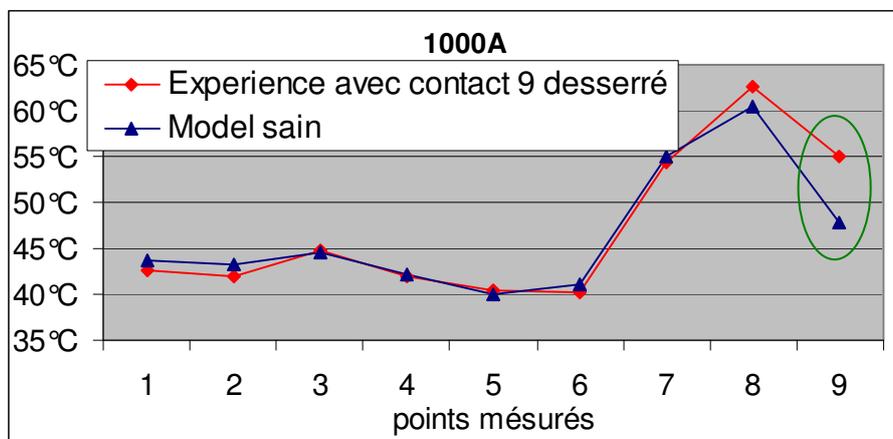


Figure 61 : Détection de l'échauffement anormal d'un contact par comparaison avec le modèle sain.

La Figure 61 nous indique que le contact 9 a une température anormalement élevée comparativement au modèle sain (+7,2°C). Les autres points de mesures étant restés relativement proches du modèle. Le point 8 qui est physiquement à coté du point 9 est quelque peu affecté par la température élevée de ce dernier (+2°C). Les différentes expériences que nous avons faites nous

révèlent qu'une différence de température supérieure à 4 °C doit nous alerter sur l'éventualité d'un défaut. Ce modèle nous permet ainsi de détecter des défauts sur les contacts électriques.

L'une des limites du modèle est qu'il n'est capable de détecter que des défauts liés à la dégradation des contacts électriques. Ainsi les défauts tels que les surcharges et l'obstruction de ventilation ne sont pas détectables via ce modèle. Dans ces deux cas cette incapacité est due au fait que les variables directement modifiées par ces défauts sont des paramètres d'entrées du modèle (le courant pour la surcharge et les températures ambiantes pour l'obstruction de la ventilation).

Nous avons testé le cas du défaut d'obstruction de la ventilation, en grandeur réelle (Figure 62).

Les orifices de circulation d'air du tableau ont été obstrués par de la laine de verre sur les parties inférieures et supérieures empêchant ainsi sa ventilation naturelle.

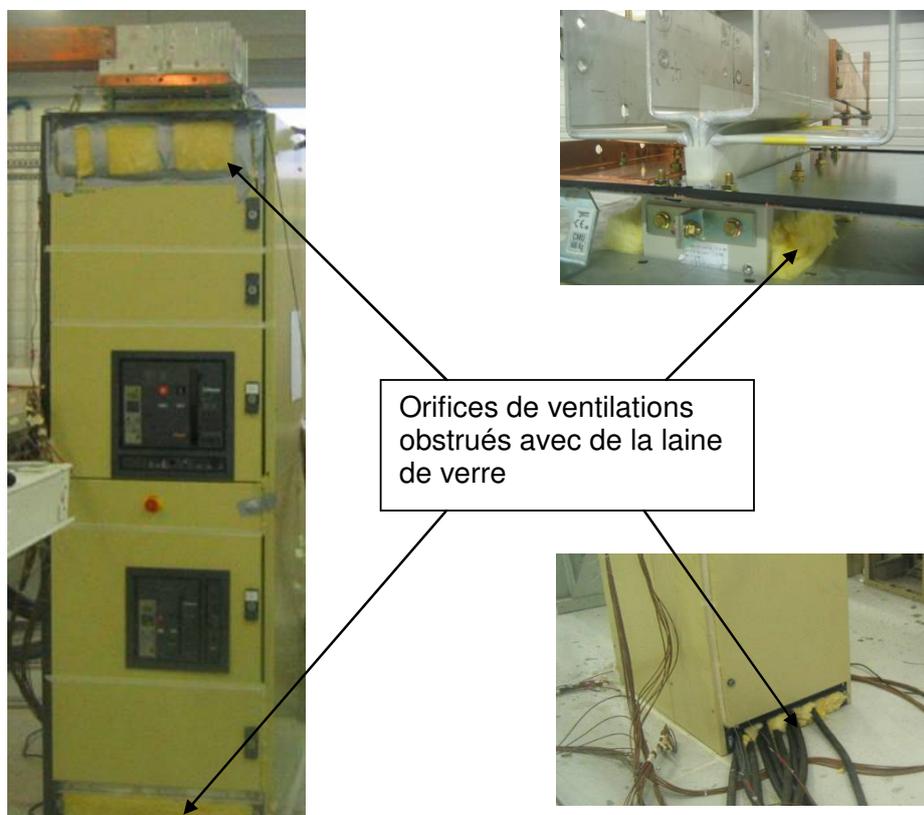


Figure 62 : Essai d'obstruction des orifices d'aération.

Ce défaut se manifeste par une élévation de toutes les températures ambiantes, ce qui entraîne l'élévation de la température de tous les points de mesures (connexions) qui sont soumis à ces températures ambiantes. Comme le montre le résultat de la Figure 63, une comparaison entre le modèle EchaufWeb et les mesures réelles effectuées ne permet pas de détecter le défaut.

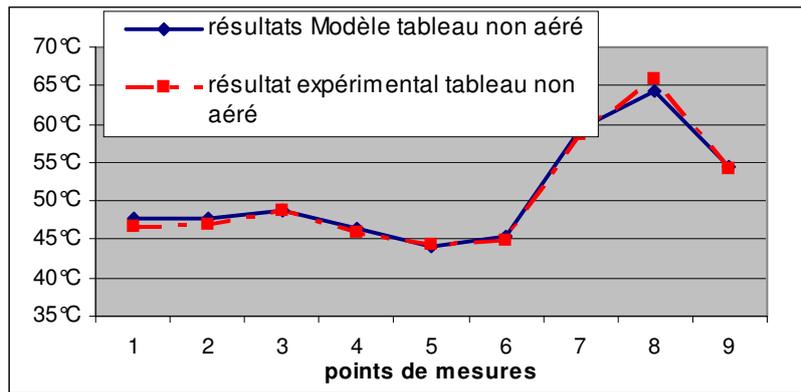


Figure 63 : Incapacité du modèle à détecter un défaut d’obstruction de la ventilation naturelle.

Cependant une analyse de l’historique des mesures sans passer par le modèle (comparaison des valeurs de températures ambiantes pour les mêmes conditions de fonctionnement (même courant)) devrait permettre la détection d’un état anormal. Nous avons fait cette comparaison sans et avec défaut. Les températures ambiantes internes du tableau sont globalement plus élevées que ce qu’elles devraient être dans le cas d’une aération normale (Figure 64).

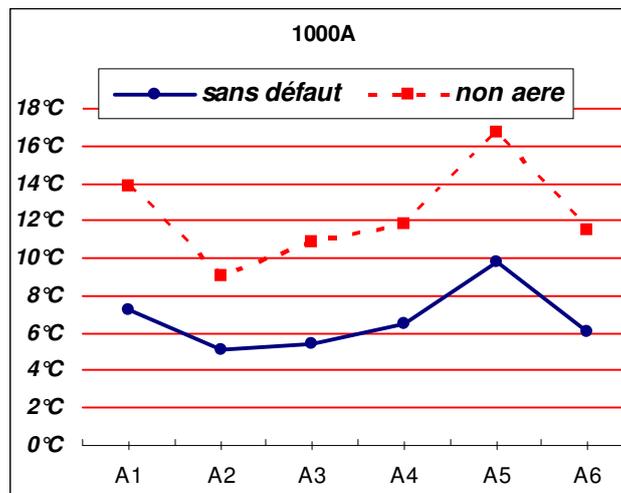


Figure 64 : Comparaison des températures ambiante avec et sans défaut de ventilation.

## IV. Diagnostic

Dans ce chapitre, nous allons utiliser l'outil de diagnostic et d'analyse de risques à base de réseau Bayésien pour diagnostiquer les causes des deux états de défaillances précédemment décrits.

### Diagnostic du défaut d'échauffement anormal du contact 9

Supposons qu'après avoir détecté l'échauffement anormal sur le contact 9 du tableau précédemment décrit, nous voulions connaître la cause de cette défaillance. Nous allons utiliser le réseau Bayésien pour nous aiguiller sur les causes possibles.

Les connaissances sur le tableau sont qu'il a un indice de protection élevé et qu'il a moins d'un an d'utilisation. L'interrogation du réseau Bayésien, avec comme évidence supplémentaire sur le tableau électrique : « échauffement anormal », nous donne directement : « mauvais serrage » comme première cause de défaillance (Figure 65). La vérification du contact supposé en défaut nous permettra de nous rendre compte de la pertinence du diagnostic. Le processus de diagnostic s'arrête là pour entreprendre les actions correctives nécessaires, à savoir le resserrage du contact ou son remplacement.

Ranked Targets	Probability	Diagnostic Value
1_Mauvais serrage:yes	0.600	
1_Surcharge Transitoire:yes	0.550	
1_Ambiance corrosive:yes	0.541	
1_Vibration:yes	0.517	
1_Environnement poussiéreux:yes	0.512	
1_Niveau de maintenance:bad	0.512	
1_Cycle de fonctionnement:h8_h24	0.512	
1_Ambiance humide:yes	0.507	
1_Surcharge permanente:yes	0.505	
1_Vis non conforme:yes	0.504	
1_Taux d'harmonique:high	0.500	
1_Age:Sup30	0	
1_Ambiance saline:yes	NOT RELEVANT	
1_Degré de protection:High_IP	NOT RELEVANT	
1_Facteur de diversité:high	NOT RELEVANT	
1_Mauvaise ventilation:yes	NOT RELEVANT	
1_Température externe élevée:yes	NOT RELEVANT	

Other observations	Evidence	State
2_Corrosion des métaux		
2_Dégradation de contacts		
2_Dégradation d'isolants		
2_Reduction des distances d'isolement		
2_Température interne élevée		
3_Déclenchements intempestifs		
3_Echauffement du neutre		
3_Perte de données Radio		
3_Risque d'amorçage		
	2_Echauffement local anormal	yes

Figure 65 : Diagnostic du défaut d'échauffement anormal détecté sur le contact 9.

## Diagnostic du défaut « températures internes élevées »

Considérons à présent, le deuxième défaut celui « d'obstruction de la ventilation ». Outre les connaissances sur le système, à savoir son indice de protection élevé (IP >3) et son âge < 1 an, l'évidence liée à ce défaut d'obstruction de la ventilation est : « températures internes élevées ».

En interrogeant l'outil de diagnostic sur les causes possibles de cette observation, nous avons le résultat de la Figure 66. Il nous dit que la cause la plus probable est « une température extérieure elle-même élevée ».

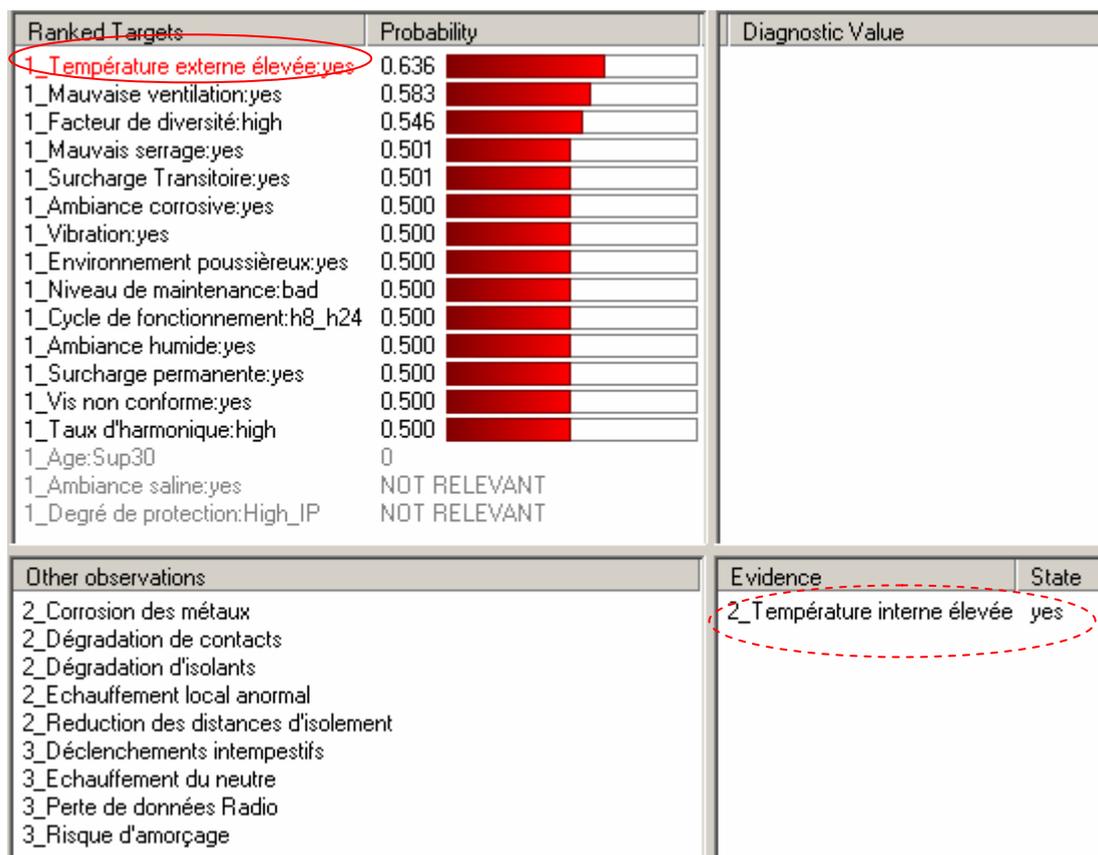


Figure 66 : Diagnostic température interne élevée étape 1.

Cependant la vérification de la température externe c'est-à-dire celle du local dans lequel se trouvait le tableau au moment de l'essai nous donne 24 °C, ce qui ne peut être qualifié d'élevé car le tableau OKKEN est prévu pour fonctionner dans une température ambiante extérieure allant jusqu'à 40°C. L'information « la température extérieure n'est pas élevée » est donc donnée comme une évidence supplémentaire au réseau Bayésien. Il vient alors le résultat de la Figure 67 indiquant que la cause la plus probable est la « mauvaise ventilation ».

Ranked Targets	Probability	Diagnostic Value
1_Mauvaise ventilation:yes	0.726	
1_Facteur de diversité:high	0.626	
1_Mauvais serrage:yes	0.503	
1_Surcharge Transitoire:yes	0.501	
1_Ambiance corrosive:yes	0.501	
1_Vibration:yes	0.500	
1_Environnement poussiéreux:yes	0.500	
1_Niveau de maintenance:bad	0.500	
1_Cycle de fonctionnement:h8_h24	0.500	
1_Ambiance humide:yes	0.500	
1_Surcharge permanente:yes	0.500	
1_Vis non conforme:yes	0.500	
1_Taux d'harmonique:high	0.500	
1_Age:Sup30	0	
1_Température externe élevée:yes	0	
1_Ambiance saline:yes	NOT RELEVANT	
1_Degré de protection:High_IP	NOT RELEVANT	

Other observations	Evidence	State
2_Corrosion des métaux		
2_Dégradation de contacts		
2_Dégradation d'isolants		
2_Echauffement local anormal		
2_Reduction des distances d'isolement		
3_Déclenchements intempestifs		
3_Echauffement du neutre		
3_Perte de données Radio		
3_Risque d'amorçage		
	2_Température interne élevée	yes

Figure 67 : Diagnostic température interne élevé étape 2.

## V. Etat des lieux du système global

Nous venons de voir sur un exemple concret ce que donne le système de détection et de diagnostic de défaut que nous avons mis en place dans ces travaux de thèse. Ce système s'inscrit globalement dans le schéma de la Figure 68 qui décrit l'enchaînement logique qui existe entre ces différentes fonctions, résumées par le triplet: { Voir, Comprendre, Agir } [42].

- La fonction « Voir » est réalisée à travers l'acquisition, la transmission (via les capteurs de températures sans fil, les disjoncteurs communicants de Schneider-Electric, le réseau internet, les serveurs) et le traitement des données pour la détection.
- la fonction « Comprendre » est réalisée à travers l'outil de diagnostic et d'analyse de risques utilisant la technique des réseaux Bayésiens.
- Enfin, la fonction « Agir » est réalisée chaque fois que le diagnostic nous permet de modifier le système à bon escient, de sorte à éliminer le défaut détecté ou même à prévenir un défaut en agissant en amont sur la conception du tableau électrique.

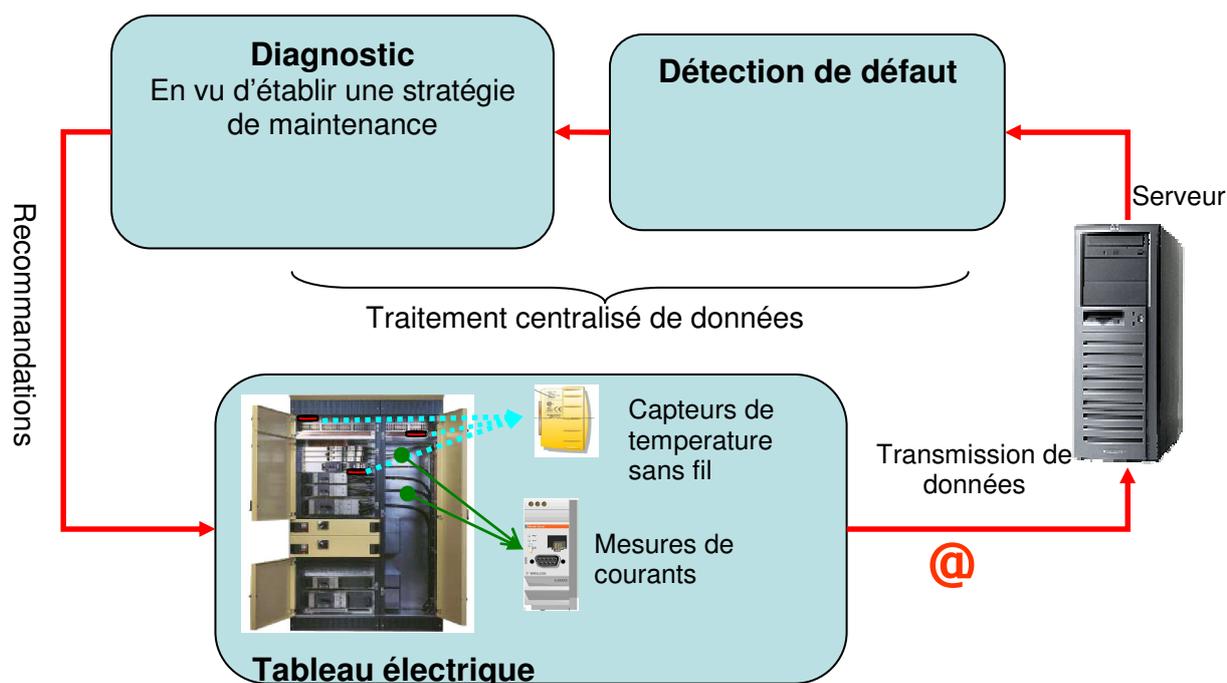


Figure 68 : Schéma du système global de détection de défaut et de diagnostic.

A ce stade, nous pouvons passer ce système en revue, en faire un état des lieux et proposer les développements possibles pour qu'il soit totalement opérationnel.

### Le système de détection.

Le système de détection qui a été présenté est constitué de :

1. La détection de dépassement de seuil de température admissible par la norme.

Ce premier indicateur a été implanté et intégré au logiciel de suivi des grandeurs électriques de Schneider-Electric. Il est opérationnel.

2. L'analyse de vieillissement.

L'algorithme de calcul de vieillissement a été spécifié, implanté sous Matcad et testé sur un exemple théorique. Il n'a pas encore fait l'objet d'intégration dans un logiciel de Schneider-Electric.

3. La détection d'échauffement anormal lié à une dégradation de contact électrique.

En ce qui concerne la détection par comparaison à un modèle physique, le logiciel de modélisation EchaufWeb a été développé et permet aujourd'hui d'effectuer le calcul et l'affichage des températures du modèle. Il est important de préciser que cet outil ne prend en compte que les défauts liés aux contacts électriques comme nous avons pu le constater dans le cas test du tableau OKKEN. Cela se justifie par le fait que c'est la première cause de défaillance. Par ailleurs, la détection de défauts se manifestant par une élévation globale des températures ambiantes pourrait se faire en dehors du modèle, par une comparaison des températures mesurées dans les mêmes

conditions de fonctionnement du tableau. Cette comparaison se fait aujourd'hui à la main avec des outils comme Excel et Matlab.

En ce qui concerne l'outil de détection via les réseaux de neurones il a été expérimenté sur un cas test, et les résultats encourageants devraient permettre son approfondissement notamment en ce qui concerne sa complémentarité possible avec la détection par modèle physique. Il n'a donc pas encore fait l'objet d'une intégration dans un logiciel.

### Le système de diagnostic.

Comparativement à l'outil de détection de l'échauffement anormal des contacts électriques, celui du système de diagnostic est beaucoup plus global et permet de diagnostiquer toutes les évidences sur les variables incluses dans le réseau Bayésien. L'exemple du diagnostic de l'obstruction de la ventilation met bien cela en évidence.

Par ailleurs, il est capable d'apprendre les paramètres (probabilités du réseau) à partir d'une base de cas enregistrés et validés.

Il a été complètement implanté dans le logiciel Génie2 et fonctionne correctement.

### Les liens entre les différents blocs.

Les différents blocs du système de détection et de diagnostic (Figure 68 ) existent et ont été testés indépendamment à travers les nombreux exemples donnés dans ce document.

Cependant, les liens entre ces différents blocs ne se font pas tous aujourd'hui de manière automatique. C'est le cas du lien entre le serveur et le bloc de détection. Il a été spécifié dans l'architecture d'EchaufWeb. Il a été implanté à 70% et n'est pas encore tout à fait opérationnel. En ce qui concerne le lien entre le bloc de détection et celui de diagnostic, il se fait manuellement aujourd'hui : L'état d' « échauffement local anormal » est rentré à la main dans le réseau Bayésien comme dans l'exemple précédent du tableau Okken.

# CONCLUSION

Ce chapitre a montré sur un tableau électrique OKKEN, configuration typique de tableau basse tension de forte puissance, les possibilités du système de détection et de diagnostic que nous avons proposé dans ce travail de thèse.

Ce test en situation réelle nous a permis :

- De nous confronter aux difficultés de mise en œuvre du modèle EchaufWeb et notamment de l'opération de calage du modèle sur les mesures réelles.
- De mettre en évidence les limites du système, à savoir son incapacité à détecter le défaut d'obstruction de ventilation en particulier, et en général des défauts se manifestant par une variation des variables d'entrées du modèle.
- De situer les différents blocs du système dans sa globalité, les passer en revue et donner des indications sur ce qu'il faut faire pour le rendre complètement opérationnel à court terme.

# CONCLUSION GENERALE

Au terme de cette thèse, nous avons développé différentes méthodes de détection et de diagnostic des causes de défaillances des tableaux électriques basse tensions dans le but d'aider à sa maintenance préventive.

Des enquêtes impliquant des experts de Schneider-Electric nous ont permis de constater que la plupart des causes de défaillances des tableaux électriques se manifestent par un échauffement, ce qui nous a conforté dans l'idée de surveiller le tableau principalement par la mesure de la température. Ces enquêtes ont aussi révélé que la principale cause de défaillance est « le défaut de raccordement ». Ainsi nous nous sommes intéressés aux contacts électriques. Différentes expériences réalisées sur ces derniers ont permis de mettre en évidence l'effet des paramètres tels que la résistance électrique, la résistance thermique et le courant, sur leur dégradation. Les résultats de ces expériences ainsi que les considérations sur l'influence des phénomènes d'échange thermique dans le tableau électrique, ont conduit à une stratégie de positionnement des capteurs de température basée sur des critères de priorités.

S'étant assuré du bon positionnement des capteurs, condition nécessaire à une bonne détection des défauts, 4 indicateurs et méthodes aidant à détecter l'échauffement anormal du contact ou son niveau de dégradation ont été présentés. Ils correspondent à deux niveaux de détection :

- La détection d'un état avancé de dégradation est possible à partir des indicateurs tels que « le dépassement des seuils d'échauffement donnés par la norme » et « le facteur de vieillissement » qui sont mis en œuvre uniquement à partir des données de températures.
- La détection d'un état de dégradation moins avancé se fait à l'aide des deux autres méthodes de détection, basées sur la mesure de l'adéquation entre le courant et la température, permettent de détecter un état moins avancé de dégradation. Il s'agit de la méthode par comparaison à un modèle sain modélisé via le logiciel EchaufWeb, et celle à partir des réseaux de neurones qui permettent d'apprendre et de reconnaître les cas de défaillances.

Après la détection vient l'étape de diagnostic. Elle s'est faite en utilisant la technique des réseaux Bayésiens. Cette technique très intuitive a l'avantage de permettre de faire, non seulement une analyse de diagnostic (explication des causes de défaillance), mais aussi une analyse préventive des risques de défaillances.

Outre les développements à très courts termes qui permettront de rendre l'ensemble du système de détection et de diagnostic complètement opérationnel (Chapitre 6), le travail mené durant cette thèse a ouvert le champ à plusieurs perspectives :

- En ce qui concerne la modélisation via EchaufWeb, aujourd'hui elle se fait en passant par une étape de calage du modèle. Cette étape manuelle peut s'avérer fastidieuse à cause du nombre important de paramètres nécessaires au calage. D'où l'intérêt d'explorer dans quelle mesure cette étape nécessaire peut être automatisée. En effet il s'agit d'un problème d'optimisation, trouver les bons paramètres qui minimisent l'erreur entre des valeurs réelles et celles calculées par le modèle. En plus, la connaissance des intervalles de variation de certains paramètres devrait permettre de restreindre le domaine de recherche de la fonction objectif.
- La piste de détection à l'aide des réseaux de neurones a été testée sur un exemple. Les résultats nous encouragent à approfondir la méthode et à l'améliorer, par exemple en la testant sur une base de données d'apprentissage et de validation de plus grande taille et constituée de mesures sur des tableaux dans des conditions réelles de fonctionnement.
- Partant du fait que la plupart des causes de défaillance se manifestent par un échauffement, nous nous sommes intéressés à la température. Si dans le cas de forts desserrages les essais de vibrations ne permettent pas de faire une bonne corrélation entre le niveau de dégradation du contact et l'amplitude fréquentielle de la vibration, cela semble être plus prometteur dans le cas des petits desserrages. La vibration pourrait donc représenter une alternative complémentaire dans la détection de défauts. Cette piste pourra être approfondie dans la suite de ce travail.
- En ce qui concerne le diagnostic, la technique des réseaux Bayésiens permet de faire une adaptation des paramètres et également de la structure du réseau, par apprentissage sur une base de cas. La plupart des logiciels de modélisation de réseaux Bayésiens permettent de faire facilement un apprentissage de paramètres. L'offre logicielle d'apprentissage de structures se développe de plus en plus. Ces possibilités d'adaptation constituent des perspectives intéressantes dans la mesure elles permettront de s'affranchir de la subjectivité de l'avis des experts. Ce qui permettrait sans doute d'améliorer la précision des conclusions

du réseau Bayésien. La principale difficulté est la construction d'une base valide en taille et en qualité.

- Le diagnostic devrait permettre de faire des recommandations de maintenances préventives. Dans le système actuel nous n'avons pas d'outil de décision qui nous guiderait par exemple pour donner les différentes recommandations suite à un diagnostic. Cet aspect de l'analyse décisionnelle n'a pas été vraiment abordé durant cette thèse et pourrait faire l'objet de travaux futurs.



# **ANNEXES**

---



## Annexe 1 : Résistances (Électrique et Thermique) d'un contact.

### 1. Le passage du courant à l'interface d'un contact électrique

Le passage du courant à l'interface d'un contact électrique se caractérise par deux phénomènes :

- L'effet tunnel à l'origine de la résistance de film.
- L'effet de striction à l'origine de la résistance de striction.

#### 1.1. La résistance de film

Au contact de l'air ambiant tout métal se recouvre d'une couche d'oxyde de quelques nanomètres d'épaisseur. A l'interface d'un contact électrique, cette couche d'oxyde offre une résistance au passage du courant. Cette résistance s'explique par un mécanisme de type « effet tunnel » [9].

L'effet tunnel désigne la propriété que possède un électron à franchir une barrière de potentiel. Ce phénomène non explicable par la mécanique classique trouve une explication dans la nature ondulatoire des électrons, régie par l'équation classique de Schrödinger en mécanique quantique [43]. La probabilité de franchissement par les électrons de la barrière créée par la couche d'oxyde à l'interface d'un contact n'est pas nulle même si les électrons ne possèdent pas toute l'énergie nécessaire. Par conséquent cette couche d'oxyde peut être conductrice de courant électrique. Par conséquent cette couche d'oxyde peut être conductrice de courant électrique. Pour caractériser la propriété conductrice de la couche d'oxyde, on introduit la résistivité superficielle qui s'exprime en  $\Omega/m^2$  La formule donnant la résistance de film est alors [7]:

$$R_{film} = \frac{\sigma_0}{S_{ef}}$$

Où

$S_{ef}$  : Surface effective de contact

$\sigma_0$  : Résistivité superficielle du matériau.

Sachant que la surface effective de contact est constituée de points élémentaires, si nous faisons l'hypothèse que nous avons n points de rayon moyen « a » alors la formule précédente devient :

$$R_{film} = \frac{\sigma_0}{n \cdot \pi \cdot a^2}$$

Où

$n$  : Nombre de points de contacts élémentaires.

$a$  : Rayon moyen des points de contacts élémentaires

## 1.2. La résistance de constriction

A l'interface du contact métallique le courant électrique passe par les contacts élémentaires.

Les lignes de courant à l'interface du contact convergent toutes vers les zones conductrices que sont les points de contacts élémentaires. Le resserrement des lignes de courant pour passer aux travers des points de contacts élémentaires est à l'origine de la résistance de constriction [8]. La résistance de constriction est une résistance purement ohmique. Elle tient compte de la résistivité  $\rho$  du matériau. En faisant l'hypothèse que la taille des conducteurs est grande devant celle des contacts élémentaires, la formule de la résistance de constriction est donnée dans [8] par:

$$R_{cons} = \frac{\rho}{2 \cdot n \cdot a}$$

Où

$\rho$  : Résistivité du matériau

$a$  : Rayon moyen des points de contacts élémentaires

$n$  : Le nombre de contacts élémentaires

## 2. Le passage du flux thermique à l'interface d'un contact électrique

### 2.1. La résistance thermique de constriction

Le transfert thermique à l'interface du contact entre deux parties métalliques est complexe et s'explique par plusieurs phénomènes dont les plus prépondérants sont :

- La conduction par les points de contacts élémentaires
- La conduction par le fluide interstitiel

Ce deuxième phénomène est moins influant à cause de la conductivité réduite des fluides par rapport aux métaux.

En ce qui concerne la conduction par les points de contacts élémentaires, les lignes de flux thermique subissent un resserrement à l'interface du contact entre les deux parties métalliques. La courbure de ces lignes de flux thermique due à leur passage préférentiel aux points de contacts élémentaires, entraîne une augmentation supplémentaire de la résistance thermique [10]-[11]. C'est le même phénomène que la résistance électrique de constriction relativement aux lignes de courant électrique. L'existence de la résistance thermique se traduit concrètement par une chute supplémentaire de température à l'interface des parties métalliques).

Ce phénomène est évoqué dans [44] par son auteur, qui attire l'attention sur le fait que même si c'est le même phénomène physique qui explique la résistance électrique de constriction et la résistance thermique de constriction, le ressenti pratique des choses est complètement différent. Et cela s'explique par le fait qu'il existe « un rapport quasi infini de la conductivité électrique des conducteurs relativement à celle des isolants, en regard du rapport correspondant en thermique ». Ainsi dans l'exemple d'un condensateur électrochimique, un copeau métallique venant s'interposer entre les deux armatures du condensateur suffit pour détruire le condensateur par court-circuit, alors que la diminution de résistance thermique de constriction dans ce cas, reste quasi indécélable.

Dans certaines situations, la résistance thermique est négligeable. Il n'en demeure pas moins que dans d'autres cas cette résistance gagne en importance et ne peut pas être toujours négligée.

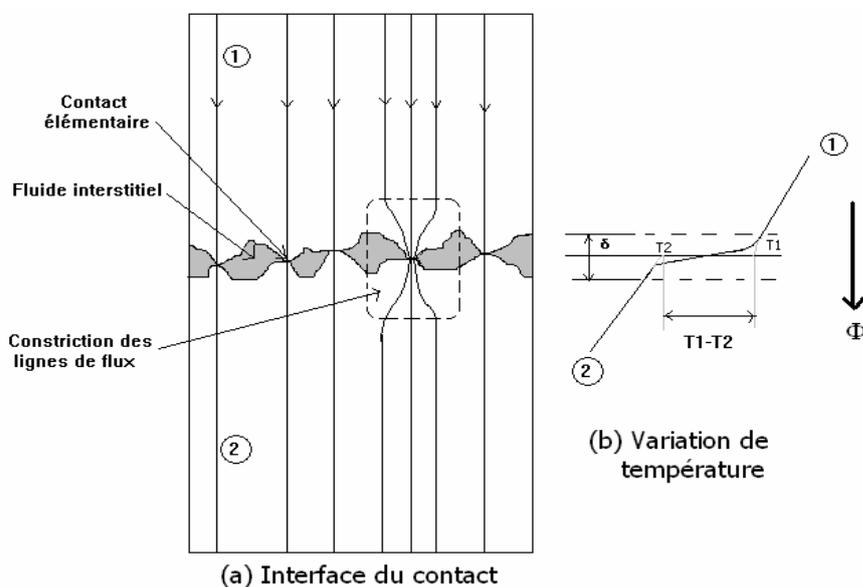


Figure 69 : Illustration de l'élongation des lignes de flux thermique à l'interface d'un contact

## 2.2. Le calcul de la résistance thermique

En écrivant la conservation du flux de chaleur conductif à l'interface du contact nous obtenons une formule théorique donnant la résistance thermique de contact.

$$\Phi = \frac{\lambda \cdot S_{ef}}{\delta} [T_1 - T_2] + \frac{\lambda \cdot S_f}{\delta} [T_1 - T_2] = C_{th} \cdot S \cdot [T_1 - T_2]$$

$$\text{D'où } R_{th} = \frac{1}{C_{th}} = \frac{1}{\frac{1}{\delta} \left( \frac{S_{ef}}{S} \cdot \lambda + \frac{S_f}{S} \cdot \lambda_f \right)}$$

Où

$\delta$  : L'épaisseur moyenne de l'interstice

$\lambda_f$  : La conductivité thermique du fluide interstitiel

$S_f$  : La surface moyenne correspondant aux interstices remplis par le fluide interstitiel.

$\lambda$  : La conductivité du métal utilisé

$S$  : La surface totale

$C_{th}$  : La conductance thermique

$R_{th}$  : La résistance thermique de contact.

Si nous négligeons la conduction dans la zone interstitielle, il vient :  $R_{th} = \frac{1}{C_{th}} = \frac{1}{\frac{1}{\delta} \left( \frac{S_{ef}}{S} \cdot \lambda \right)}$

## Annexe 2 : Exemple de Calcul de la résistance thermique.

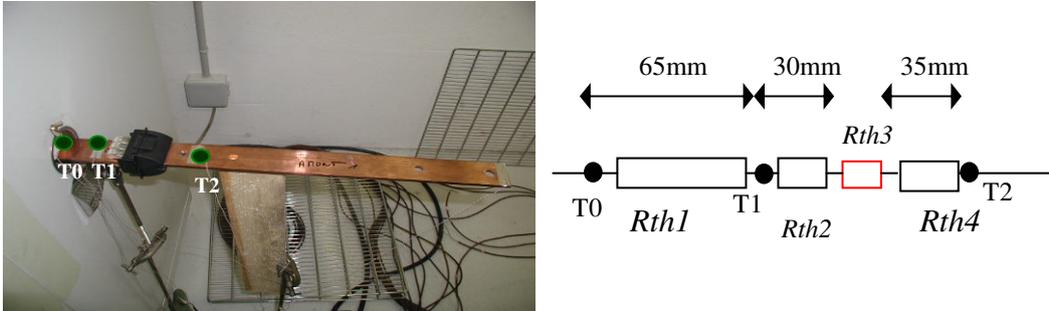


Figure 70 : Montage servant au calcul de la résistance thermique par la mesure de la température.

- La conservation du flux thermique de conduction mène à :

$$(R_{th3} + R_{th2} + R_{th4})(T_0 - T_1) = R_{th1} \cdot (T_1 - T_2)$$

$$\text{Soit, } R_{th3} = R_{th1} \cdot \frac{(T_1 - T_2)}{T_0 - T_1} - (R_{th2} + R_{th4})$$

- Calcul de Rth2 et Rth4 : Particulièrement sur ce montage on a :  $R_{th2} + R_{th4} = R_{th1}$

$$\text{Calcul de Rth1 : } R_{th1} = \frac{L}{\lambda * S} = 0.82^\circ\text{C/W}$$

Avec L (longueur de la barre)= 65mm, S (section de la barre)= 40\*5 mm<sup>2</sup> et λ(conductivité thermique du cuivre)=385W/°C.m

D'où les résultats suivants :

	1 pince barre courte	1 pince barre longue	3 pinces barre courte	3 pinces barre longue	boulonnée barre courte	boulonnée barre longue
T0[°C]	76,1	73,7	69,3	76	69,1	75,4
T1[°C]	72,3	69,4	64,3	71,9	64,2	71,4
T2[°C]	57,4	48,6	53,7	63,4	57,6	68
Rth [°C/W]	2.5	2.9	0.9	0.9	0.1	0.3

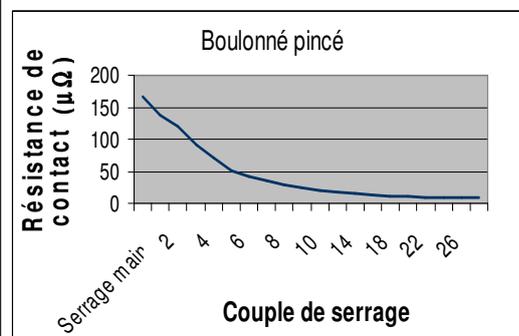
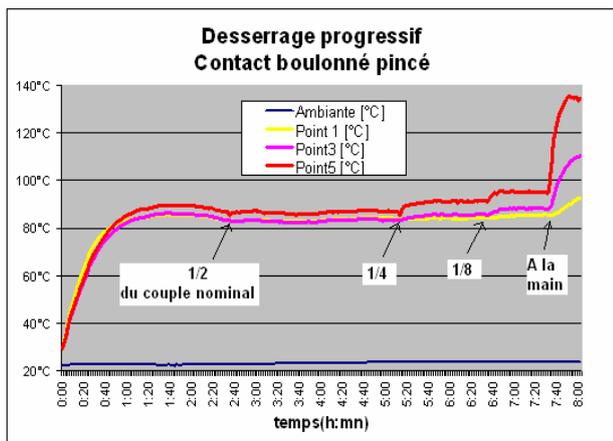
Tableau 4 : Tableau de valeurs de résistances thermiques issues du calcul.



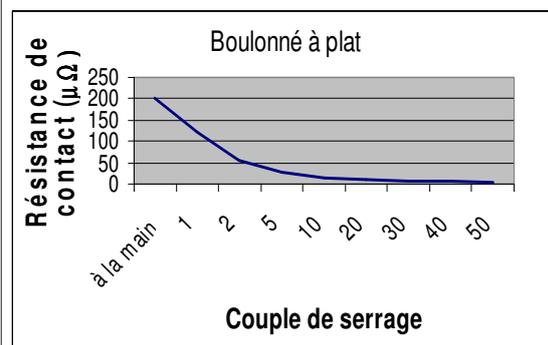
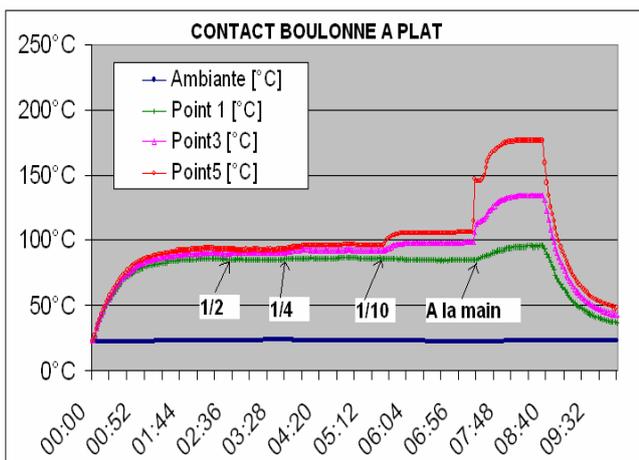
## Annexe 3 : Résultats de l'essai de desserrage progressif sur les contacts de type boulonné.

Les courbes ci-dessous représentent les profils de températures enregistrées (pour chaque type de contact) lors de l'essai de desserrage ainsi que les variations de résistances électriques mesurées.

### Contact boulonné pincé



### Contact boulonné à plat



## Contact boulonné Surchant

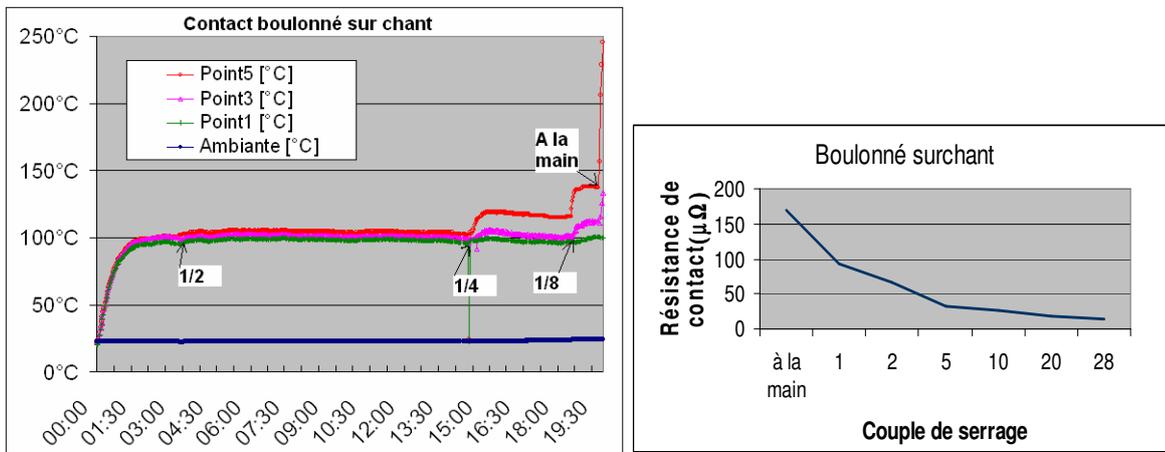


Figure 71 : Profils de températures obtenus lors de l'essai de desserrage des contacts boulonnées

## Annexe 4 : Théorie de transfert thermique

### 1. Conduction

La conduction thermique est le mode de transfert de chaleur provoqué par une différence de température entre deux régions d'un même milieu ou entre deux milieux en contact sans déplacement appréciable de matière.

Il existe deux types de conduction :

- La conduction simple où le corps solide n'est le siège d'aucune création de chaleur, par exemple la conduction dans un mur.
- La conduction vive où le corps solide est le siège d'une création de chaleur, par exemple la conduction dans les barres de cuivre parcourues par un courant électrique.

La transmission de chaleur par conduction est régie par la loi de Fourier qui traduit un débit de chaleur dû à un gradient de température. Son expression unidimensionnelle se réduit à :

$$\Phi_{cond} = \lambda \cdot S \cdot \frac{(T_1 - T_2)}{L}$$

Où

$\Phi_{cond}$  : Flux échangé entre deux points 1 et 2 d'un solide en W

$S$  : Surface d'échange en m<sup>2</sup>

$T_1, T_2$  : Température respectivement aux points 1 et 2 du solide.

$L$  : Distance entre les deux points considérés

$\lambda$  : Conductivité thermique en W/m°C du matériau du solide.

La conductivité thermique est une caractéristique du matériau. A titre indicatif, voici quelques valeurs de conductivité de matériau utilisé dans le tableau électrique.

	Cuivre	Argent	Aluminium	PVC
$\lambda$ (W/m°C )	385	420	203	0.167

Tableau 5 : Exemples de conductivité thermique de certains matériaux

## 2. Convection

La convection se définit comme un échange thermique entre un fluide en mouvement et un corps solide. La convection peut se faire de manière naturelle ou forcée avec un ventilateur par exemple. Pour un fluide à la température  $T_\infty$  autour d'un solide de surface  $S$ , à la température uniforme  $T_s$ , l'expression du flux de chaleur en convection est donnée par la formule de Newton :

$$\Phi_{conv} = h \cdot S(T_s - T_\infty)$$

Où

$\Phi_{conv}$  : Flux convectif échangé en W entre le fluide et le corps solide.

$S$  : Surface d'échange en m<sup>2</sup>

$T_s$  : Température à la surface du solide

$T_\infty$  : Température du fluide

$h$  : Coefficient d'échange convectif en W/°K\*m<sup>2</sup>

Le coefficient d'échange convectif dépend des conditions d'écoulement du fluide et de la forme du solide. Son calcul fait intervenir un paramètre sans dimension de la mécanique des fluides, qui est le nombre de Nusselt (Nu).

Dans le cas de la convection naturelle le nombre de Nusselt dépend de deux autres paramètres qui sont le nombre de Prandtl (Pr) et celui de Grashof ( $Gr$ ). Soit  $Nu = K.(Gr \cdot Pr)^\alpha$  avec  $K$  et  $\alpha$  constantes.

Dans le cas de la convection forcée le nombre de Nusselt dépend du nombre caractéristique de Reynolds et du nombre de Prandtl.  $Nu = K.Re^\alpha \cdot Pr^\beta$  avec  $K$ ,  $\alpha$  et  $\beta$  des constantes.

Dans la réalité le coefficient d'échange convectif est difficilement calculable de manière analytique. Il faut donc recourir à des techniques numériques.

## 3. Rayonnement

Le rayonnement est un phénomène de transfert thermique par l'intermédiaire d'ondes électromagnétiques, entre deux milieux séparés par un milieu transparent. L'exemple de rayonnement le plus connu est le rayonnement. Le rayonnement fait intervenir des phénomènes physiques complexes. Pour simplifier la compréhension du phénomène de rayonnement, l'exemple

pris classiquement est celui du corps noir. Le corps noir est un modèle théorique correspondant à un corps qui absorbe toute l'énergie qu'il reçoit sans aucune réflexion.

D'après la loi de Stephan Boltzmann, le flux thermique rayonné par un corps noir est donné par :

$$\Phi = \sigma \cdot S \cdot T^4$$

Les corps réels sont pris comme étant une approximation du corps idéal qu'est le corps noir. Ainsi pour étendre la formule de rayonnement à ces derniers, on introduit le coefficient d'émissivité  $\varepsilon$ .

La formule générale devient :

$$\Phi = \varepsilon \cdot \sigma \cdot S \cdot T^4$$

Où :

$\Phi$  : Flux rayonné par un corps en W

$S$  : Surface d'émission en m<sup>2</sup>

$T$  : Température des corps en regard

$\varepsilon$  : Emissivité

Le coefficient d'émissivité mesure l'écart qu'il y a entre un corps noir et un corps réel en terme d'émission d'énergie. Il dépend de la nature du matériau et de plusieurs paramètres dont l'état de surface, la température, la longueur d'onde, la direction d'émission de l'onde etc.

L'échange radiatif entre deux corps est complexe à décrire. On fait communément intervenir un coefficient sans dimension appelé facteur de forme ( $F$ ) qui dépend de l'émissivité des deux corps qui échangent et de leur géométrie.

Le flux thermique échangé entre deux corps respectivement de surface  $S_1$  et  $S_2$  et de température  $T_1$  et  $T_2$  est donné par :

$$\Phi_{rad} = F_{1,2} \cdot \sigma \cdot S_1 \cdot (T_1^4 - T_2^4)$$

Où

$\Phi_{rad}$  : Flux radiatif échangé entre deux corps en W

$S_1, S_2$  : Surface d'émission en m<sup>2</sup>

$T_1, T_2$  : Température des corps en regard

$F_{1,2}$  : Facteur de forme

Pour simplifier les calculs et pour faire l'analogie avec l'échange par convection et par conduction, on définit un coefficient d'échange radiatif  $h_r$ , la formule précédente devient :

$$\Phi_{rad} = h_r \cdot S_1 \cdot (T_1 - T_2)$$

$$\text{avec } h_r = F_{1,2} \cdot \sigma \cdot (T_1^3 + T_1^2 \cdot T_2 + T_1 \cdot T_2^2 + T_2^3)$$

## Annexe 5 : Algorithme de vieillissement

Cette figure donne une vision schématique de l'algorithme de vieillissement présenté au chapitre 4.

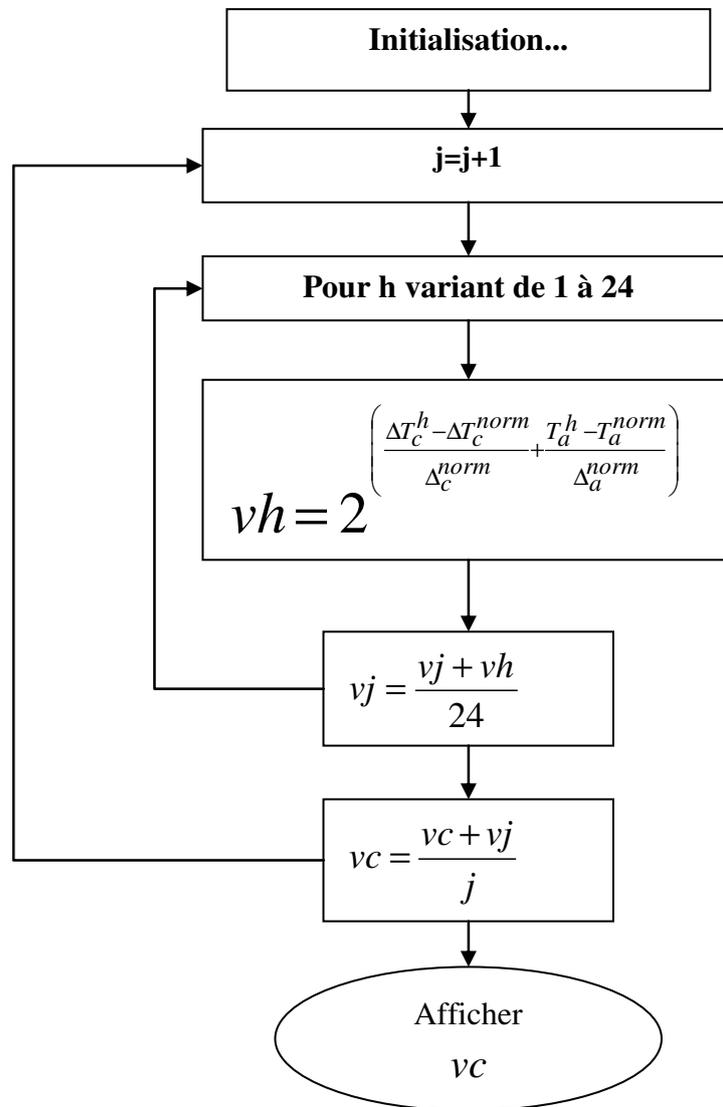


Figure 72 : Algorithme de vieillissement



## Annexe 6 : Tables de probabilités associées aux variables intermédiaires et terminales du réseau Bayésien

### ◆ Dégradation de contact (noisy or node)

parent	Mauvais serrage		Visserie non conforme		Cycle de fonctionnement		Maintenance Force		Corrosion des métaux		Surcharges transitoires		Vibration	
	yes	no	yes	no	8h/24h	24h/24h	high	small	yes	no	yes	no	yes	no
yes	0.8	0	0.05	0	0.15	0	0.6	0	0.5	0	0.25	0	0.2	0
no	0.2	1	0.95	1	0.85	1	0.4	1	0.5	1	0.75	1	0.8	1

Tableau 6 : Table de probabilités de la variable « Dégradation de contact »

### ◆ Température interne élevée (noisy or node)

parents	Température externes élevée		Mauvaise ventilation		Echauffement local anormal		Facteur de diversité	
	yes	no	yes	no	yes	no	high	normal
yes	0.99	0	0.75	0	0.05	0	0.5	0
no	0.01	1	0.25	1	0.95	1	0.5	1

Tableau 7 : Table de probabilités de la variable « Température interne élevée »

### ◆ Echauffement local anormal (noisy or node)

Parent	Dégradation de contacts		Taux d'harmoniques		Surcharge permanentes		Surcharges transitoires	
	yes	no	high	normal	yes	no	yes	no
yes	0.9	0	0	0	0.05	0	0.25	0
no	0.1	1	1	1	0.95	1	0.75	1

Tableau 8 : Table de probabilités de la variable « Echauffement local anormal »

### ◆ Réduction d'isolement

Degré de protection	High_IP								Samll_IP							
	yes				no				yes				no			
Dégradation d'isolants	yes		no		yes		no		yes		no		yes		no	
Ambiance humide	yes	no	yes	no	yes	no	yes	no	yes	no	yes	no	yes	no	yes	no
Ambiance saline	yes	no	yes	no	yes	no	yes	no	yes	no	yes	no	yes	no	yes	no
yes	0.8	0.65	0.4	0.4	0.4	0.1	0.05	0	1	0.85	0.6	0.4	0.5	0.25	0.1	0
no	0.2	0.35	0.6	0.6	0.6	0.9	0.95	1	0	0.15	0.4	0.6	0.5	0.75	0.9	1

Tableau 9 : Table de probabilités de la variable « Réduction d'isolement »

◆ Perte de données radio

Environnement poussiéreux	yes	no
yes	0.65	0.3
no	0.35	0.7

Tableau 10 : Table de probabilités de la variable « Perte de données radio »

◆ Déclenchements intempestifs. (noisy or node)

parents	Température interne élevée		Vibration		Surcharges transitoires		Surcharges permanentes	
	yes	no	yes	no	yes	no	yes	no
yes	0.7	0	0.15	0	0.5	0	0.99	0
no	0.3	1	0.85	1	0.5	1	0.01	1

Tableau 11 : Table de probabilités de la variable « Déclenchements intempestifs »

◆ Dégradation d'isolants

Température interne élevée	yes	yes	yes	yes	no	no	no	no
Echauffement local anormal	yes	yes	no	no	yes	yes	no	no
Ambiance corrosive	yes	no	yes	no	yes	no	yes	no
yes	1	0.8	0.4	0.1	0.65	0.5	0.25	0
no	0	0.2	0.6	0.9	0.35	0.5	0.75	1

Tableau 12 : Table de probabilités de la variable « Dégradation d'isolants »

◆ Corrosion de métaux

Ambiance humide	yes	yes	no	no
Ambiance corrosive	yes	no	yes	no
yes	1	0.05	0.75	0
no	0	0.95	0.25	1

Tableau 13 : Table de probabilités de la variable « Corrosion de métaux »

◆ Risques d'amorçage

Reduction d'isolement	yes	no
yes	0.9	0.01
no	0.1	0.99

Tableau 14 : Table de probabilités de la variable « Risques d'amorçage »

## Annexe 7 : Tables des paramètres dimensionnels EchaufWeb en fonction de la section des câbles isolés

En générale quand on modélise un conducteur isolé seul sa section est connue. Ce tableau donne (en fonction de la section du conducteur), les périmètres et les sections d'échanges du conducteur et de son isolant. Ces valeurs sont utiles pour la modélisation EchaufWeb des câbles isolés

Conducteur (âme)		Isolant		
Section nominale (mm <sup>2</sup> )	Périmètre (mm)	section (mm <sup>2</sup> )	Périmètre (mm)	épaisseur (mm)
1.5	4.3	5.6	9.4	0.8
2.5	5.6	7.7	11.3	0.9
4	7.1	9.9	13.2	1.0
6	8.7	11.3	14.8	1.0
10	11.2	18.3	18.8	1.2
16	14.2	28.2	23.6	1.5
25	17.7	41.5	28.9	1.8
35	21.0	51.6	33.0	1.9
50	25.1	70.8	39.0	2.2
70	29.7	92.9	45.2	2.5
95	34.6	129.3	53.1	3.0
120	38.8	154.6	58.7	3.2
150	43.4	196.4	66.0	3.6
185	48.2	234.1	72.6	3.9
240	54.9	295.0	82.0	4.3

Ces données sont issues du catalogue "câbles SILEC" (câble H07V-K)

Tableau 15 : Tableau de sections et des périmètres d'échange des câbles isolés.



## Annexe 8 : Analyse de sensibilité sur les températures résultantes du modèle thermique de détection par rapport aux erreurs sur les dimensions de jeux de barres.

A titre indicatif nous avons fait une étude de sensibilités des températures résultantes du modèle par rapport aux erreurs faites sur les dimensions de jeu de barres qui peuvent être mesurées approximativement , dans le cas où nous ne disposons pas des plans de construction du tableau électrique. Cette étude montre qu'une erreur sur la longueur ou sur la section des jeux de barres jusqu'à 10%, engendre respectivement moins de 2% (pour les longueurs) et moins de 5% (pour les sections) de variation sur la température. C'est donc une valeur d'erreur acceptable.

**Erreur ! Liaison incorrecte. Erreur ! Liaison incorrecte.  
Erreur ! Liaison incorrecte. Erreur ! Liaison incorrecte.**

Figure 73 : Analyse de sensibilité, par rapport aux erreurs dimensionnelles, des températures calculées par EchaufWeb.



# **BIBLIOGRAPHIE**

---



## Bibliographie

---

- [1] Kahan N'guessan, Eric Jouseau , Jean-Pierre ROGNON, Gilles Rostaing , Florence François "A new approach for local detection of failures and global diagnosis of LV switchboards." IEEE International Conference on Power Engineering, Setubal, April 2007.
- [2] Kahan N'guessan, Eric Jouseau , Gilles Rostaing , Florence François "A Joint faults detection in LV switchboard and its global diagnosis, through a Temperature Monitoring System" IEEE International Conference on Industrial Technology, Mumbai, December 2006.
- [3] Sandy Dunn. "Condition Monitoring in the 21st century." Plant Maintenance Resource Center 20 sept. 2006 available at <http://www.plant-maintenance.com/articles/ConMon21stCentury.shtml>.
- [4] Roland AUBER. "Techniques de l'ingénieur: Tableaux et armoires." 1997
- [5] Fernando Lisboa. "Thermal Imaging in a predictive maintenance program." Sensors Magazine, August 2003.
- [6] Albert Livshitz, Bella H. Chudnovsky, Boris Bukengolts, Boris A Chudnovsky. "On-Line Temperature Monitoring of Power Distribution Equipment." PCIC 2005 Denver, USA: 2005. pp223-231.
- [7] International Electrotechnical Commission. "IEC-60943, paragraph 2.3.2 Calculation of the Film resistance." 1998.
- [8] International Electrotechnical Commission. "IEC-60943, paragraph 2.3.1 Calculation of the Constriction resistance." 1998
- [9] Christian Ngô ,HélèneNgô. "Chapitre 4.7 : Effet tunnel." Physique quantique Introduction Ed. Dunod Paris: 2000. pp 166-171.
- [10] Bernard Eyglunent. "Chapitre 3.2 : La question des interfaces." Thermiques Théorie et pratique à l'usage de l'ingénieur Hermes, 1994.

- 
- [11] Ana-Maria Bianchi, Yves Fautrelle, Jacqueline Etay. "Chapitre 2.3.2 : Résistance thermique de contact." Transferts thermiques Presse polytechniques et universitaires Romandes, 2004.
- [12] L. Féchant. Le contact électrique : l'appareillage de connexion Hermes, 1994.
- [13] International Electrotechnical Commission. " IEC-60943.1, paragraph 2.2 Nature of electric contact." 1998.
- [14] John Hus. "Reduction of Joint Force by Creep in High Current Joints." IEEE Transactions on Industry Applications 26.5 (1990), pp 926-934.
- [15] International Electrotechnical Commission. "IEC-60943, paragraph3 page 31, Ageing mechanisms of contacts and connection terminals." 1998.
- [16] Stephan Schoft. "Measurement and calculation of the decreasing joint force in high current aluminum joints." 22nd Conference on Electrical Contacts Seattle: 2004, pp 511-518.
- [17] International Electrotechnical Commission. "IEC-60354, Chapitre 6.2 Vieillessement Thermique des isolants des transformateurs." IEC, 1992.
- [18] Mathsoft Engineering and Education, Inc. " Logiciel Matcad 12."
- [19] International Electrotechnical Commission. "IEC-890, A method of temperature-rise assessment by extrapolation for partially type-tested assemblies (PTTA) of low-voltage switchgear and controlgear." IEC, 1987.
- [20] Rapport de stage ECHAUFFWEB disponible dans la base :  
P:\PROJETS\Eds\5\_EDS\_TEAM\projet\_EchauFWeb\DOCS\index.htm
- [21] F. Rosenblatt. "Principles of Neurodynamics." New York: Spartan Books, 1962.
- [22] Christopher M. Bishop. "Section4.3.1 Three-Layers Network." Neural Network for Pattern Recognition Oxford university press, 2005. pp 129-132.
- [23] Christopher M. Bishop. "Section 9 Learning and Generalization." Neural Network for Pattern Recognition Oxford university press, 2005. pp 332-333.
- [24] Christopher M. Bishop. "Section 7.11 The Levenberg-Marquardt algoritm." Neural Network for Pattern Recognition Oxford university press, 2005. pp290-292.

- 
- [25] Christopher M. Bishop. "Section 4.8 Error Back-propagation." Neural Network for Pattern Recognition Oxford university press, 2005, pp 140-160.
- [26] Hagan, M.T, and M. Menhaj, "Training feedforward networks with the Marquardt algorithm," *IEEE Transaction on neural networks*, Vol .5 n°6, pp.989-993, 1994.
- [27] Claus Skaanning, Finn V. Jensen, Uffe Kjærulff, Paul Pelletier & Lasse Rostrup-Jensen, "Printing System Diagnosis A Bayesian Network Application" presented at Ninth International Workshop on Principles of Diagnosis, Massachusetts, USA, 1998, Available: [www.cs.auc.dk/~uk/papers/skaanning:etal:98.doc](http://www.cs.auc.dk/~uk/papers/skaanning:etal:98.doc)
- [28] FinnV.Jensen. "Bayesian Networks and decision graph: Statistics for engineering and information" science Springer-Verlag, 2001.
- [29] Patrick Naïm, Pierre-henri Wuillemin, Philippe leray, Olivier Pourret, Anna Becker. "Réseaux Bayésiens." Eyrolles, 2004.
- [30] Patrick Naïm, Pierre-henri Wuillemin, Philippe leray, Olivier Pourret, Anna Becker. "Chapitre 1.1.2 D-séparation (blocage)." Réseaux Bayésiens Eyrolles, 2004.
- [31] Murphy, Bayes Net Toolbox for Matlab, available at [www.cs.berkeley.edu/~murphyk/Bayes/bnt.html](http://www.cs.berkeley.edu/~murphyk/Bayes/bnt.html)
- [32] Patrick Naïm, Pierre-henri Wuillemin, Philippe leray, Olivier Pourret, Anna Becker. "Chapitre 1.1.1 Circulation de l'information dans un graphe causal." Réseaux Bayésiens Eyrolles, 2004. pp 4-6.
- [33] Heckerman, "A Tutorial on Learning with Bayesian Networks", *Technical report Microsoft Research MSR-TR-95-06*, 1996.
- [34] Patrick Naïm, Pierre-henri Wuillemin, Philippe leray, Olivier Pourret, Anna Becker. "Chapitre 2.2: Apprentissage." Réseaux Bayésiens Eyrolles, 2004. pp 30-36.
- [35] Christophe Kilindjian, Thermal study of LV electric switchboards, available at [www.schneiderelectric.com/cahier\\_technique/en/abstracts/thermal\\_study\\_LV\\_switchboards.htm](http://www.schneiderelectric.com/cahier_technique/en/abstracts/thermal_study_LV_switchboards.htm)
- [36] Olivier Bouju dependability and LV switchboards Cahier technique n°156 [www.schneiderelectric.com/cahier\\_technique/en/abstracts/dependability\\_LV\\_switchboards.htm](http://www.schneiderelectric.com/cahier_technique/en/abstracts/dependability_LV_switchboards.htm)

- 
- [37] Les cahiers GIMELEC, Tableaux électriques basse tension n° 4 : "La maîtrise des effets thermiques". [www.gimelec.fr/techf.htm](http://www.gimelec.fr/techf.htm)
- [38] International Electrotechnical Commission. "IEC-60439.1 , Chapitre 6.1.1.1 : Température de l'air ambiant pour les installations à l'intérieur." IEC, 2004.
- [39] FinnV.Jensen, "Noisy-Or", in Bayesian Networks and decision graph, Statistics for engineering and information science, Springer 2001, sec2.3.2, pp 59-60.
- [40] Przytula, K.W. Dash, D. Thompson, D. "Evaluation of Bayesian networks used for diagnostics", proc. IEEE Vol.7, Sep 2003. pp: 3177- 3187.
- [41] Patrick Naïm, Pierre-henri Wuillemin, Philippe leray, Olivier Pourret, Anna Becker. "Chapitre 6.1.2 : A partir de données incomplètes" Réseaux Bayésiens Eyrolles, 2004. pp 103-106.
- [42] Basseville, M. and Cordier, M.O. 1996. Surveillance et diagnostic de systèmes dynamiques : approches complémentaires du Traitement de Signal et de l'Intelligence Artificielle. Rapport de Recherche INRIA 2861.
- [43] Christian Ngô ,HélèneNgô. "Chapitre 1.5.4 : Equation de Schrödinger" Physique quantique Introduction Ed. Dunod Paris: 2000. pp 166-171.
- [44] Alain DEGIOVANNI. "Technique de l'ingénieur: Transmission de l'énergie thermique." available at [www.techniques-ingenieur.fr](http://www.techniques-ingenieur.fr)