

# MÉMOIRE D'INGÉNIEUR

Présenté par

**Patrice Dogé**

**Spécialité : Mécanique**

Création du synoptique des règles de conception des collecteurs  
tournants et ajout de règles manquantes

Réalisé dans l'entreprise :

**Exxelia Group**

**Soutenu le 03/09/2024**

**Jury :**

**M. CHICHEPORTICHE Jean-Marc**

**Mme. AZROUF - GAMRANI Sabrina**

**M. LIMOUSIN Franck**

CONFIDENTIEL

## I. Remerciements

Je tiens particulièrement à remercier Franck Limousin, mon tuteur entreprise, qui m'a encadré et guidé pendant ces trois ans de formation.

Ensuite, je remercie Alexandre Mensales, le directeur Bureau d'Études, de m'avoir accueilli et de m'avoir fait confiance sur les différents projets qui m'ont été attribués.

Je souhaite également remercier Julien Dessalles, l'un des ingénieurs conception, pour ses précieux conseils qu'il m'a donnés tout au long de mes recherches.

J'aimerais remercier Gaëlle Pettinelli et Arnaud Chagnon, ingénieurs conception, qui se sont montrés disponibles pour répondre à toutes mes questions.

Je remercie aussi Jean Yammine, PhD optique, qui m'a épaulé sur les calculs mathématiques de ce mémoire.

Merci à toutes les personnes d'Exxelia Chanteloup avec lesquelles j'ai travaillé sur ce mémoire.

## II. Table des matières

I.	Remerciements .....	3
II.	Introduction .....	6
1.	Présentation de l'entreprise .....	6
2.	Contexte .....	6
3.	Présentation d'un collecteur tournant.....	6
3.1	Fiber Optical Rotary Joint (FORJ).....	7
3.2	Codeur optique.....	7
3.3	Joint rotatif hydraulique.....	8
III.	Synoptique des règles de conception des collecteurs tournants.....	9
1.	Détermination des différentes briques technologiques .....	9
1.1	Qu'est-ce qu'une brique technologique .....	9
1.2	Qu'est-ce qu'une règle de conception.....	9
1.3	Comment définir les différentes briques technologiques.....	9
1.4	Définition des briques technologiques.....	11
1.5	Caractérisation des corrélations de chaque brique avec le cahier des charges .....	15
2.	Analyse de l'interdépendance des briques technologiques entre elles.....	17
3.	Création d'un logigramme complet de conception .....	21
3.1	Règles de conception déjà existantes.....	24
4.	Règle de conception du diamètre du fils .....	25
4.1	Norme IEC 60287 courant admissible dans les câbles .....	25
4.2	Transposition dans une feuille de calcul.....	34
4.3	Résolution de la fonction de l'intensité de la IEC 60287-1-1.....	38
4.4	Régression puissance sur la IEC 60287-1-1 .....	39
4.5	Norme MIL-STD-339: Wiring & wiring device for combat and tactical vehicles, selection and installation .....	42
4.6	Régression sur MIL STD 339 .....	45
4.7	Facteur de correction pour groupe de câble.....	48
4.8	Comparaison avec des données mesurées.....	48
IV.	Conclusion.....	51
V.	Synthèse de formation.....	52

1. Parcours académique.....	52
2. Parcours professionnel .....	52
3. Compétences acquises.....	53
4. Difficultés rencontrées .....	53
VI. Conclusion générale .....	54
VII. Glossaire.....	55
VIII. Bibliographie.....	56
IX. Table des figures et tableaux.....	57
I. Annexe .....	59

CONFIDENTIEL

### III. Introduction

#### 1. Présentation de l'entreprise

Exxelia est un groupe industriel de plusieurs sociétés spécialisées dans la haute technologie électronique. Ce groupe met en place certains produits électroniques tels que des condensateurs, des filtres, des capteurs potentiométriques, des collecteurs tournants, des composants bobinés (transformateurs, selfs inductance, moteur ou capteur), ainsi que de la mécanique de précision. Chacune des huit entreprises du groupe Exxelia est spécialisée dans un domaine en particulier. Le groupe Exxelia compte aujourd'hui plus de 1200 collaborateurs.

#### 2. Contexte

Dans un contexte industriel en constante évolution, la standardisation et l'harmonisation des processus de conception deviennent essentielles pour assurer la qualité, la fiabilité et la compétitivité des produits. Ce mémoire se propose d'aborder la création d'un synoptique des règles de conception des collecteurs tournants, ainsi que l'élaboration de règles manquantes, afin d'établir une méthodologie commune à tous les concepteurs.

Le besoin de ce projet émane d'une observation claire : l'absence d'une méthodologie unifiée et de règles de conception standardisées pour les collecteurs tournants chez Exxelia. Cette lacune peut entraîner des inefficacités et des incohérences dans le processus de conception, affectant potentiellement la qualité et la performance des produits. En créant un synoptique des règles de conception et en ajoutant des règles manquantes, il serait possible de pallier ces insuffisances et de renforcer la fiabilité des processus de conception au sein de l'entreprise.

Mon rôle a été d'analyser les pratiques existantes, d'identifier les lacunes et de proposer des solutions pratiques et applicables pour standardiser et améliorer les processus de conception.

#### 3. Présentation d'un collecteur tournant

Un collecteur tournant, aussi appelé "slip ring" est un dispositif électromécanique permettant de transmettre des signaux électriques, des données et de la puissance entre la partie fixe (stator) et la partie rotative (rotor) d'un système. Cet organe est essentiel dans de nombreuses applications telles que les tourelles de chars, les radars, les systèmes de surveillance et les satellites.

Les collecteurs tournants se composent généralement de plusieurs brins et d'une piste.

Les brins sont des filaments conducteurs qui transportent les signaux électriques et les signaux

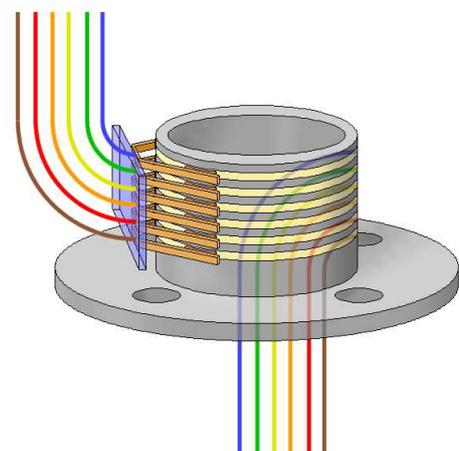


Figure 1 Schéma d'un collecteur tournant avec support brins

de puissance. Ces brins sont brasés avec des fils sur des supports brins.

La piste est une surface conductrice sur laquelle les brins glissent pour maintenir la connexion électrique pendant la rotation. L'assemblage de plusieurs pistes entrecoupées par des isolants permet de faire plusieurs voies différentes. L'ensemble de ces pistes et isolants s'appelle un moyeu. Cette conception permet de réaliser une transmission stable et continue, même dans des conditions de rotation rapide.

Chaque collecteur tournant est conçu sur mesure pour un client. Il existe plusieurs options de collecteurs tournants :

### 3.1 Joints rotatifs à fibre optique (FORJ)

Les joints rotatifs à fibre optique (Fiber Optic rotary joints) sont des dispositifs mécaniques qui permettent de transmettre des signaux optiques entre les parties fixes et rotatives d'un système. Ils se positionnent sur l'axe de rotation. Plusieurs solutions techniques sont utilisées pour sa réalisation. La technique la plus simple utilise des lentilles à gradient d'indice permettant de positionner le signal parfaitement parallèle à l'axe de rotation afin que le signal réceptionné ne soit pas altéré lors de la rotation<sup>1</sup>.

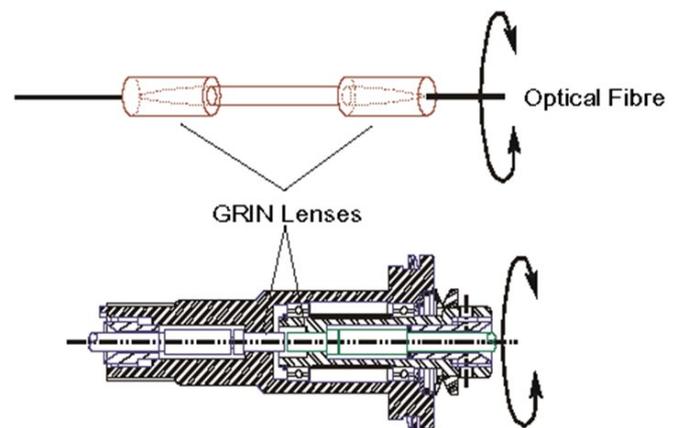


Figure 2 FORJ mono voie à lentille à gradient d'indice<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Glenn Dorsey et Michael O'Brien, « Fiber Optic Rotary Joints (FORJ) - Performance and Application Highlights », s. d.

### 3.2 Codeur optique

Un **codeur optique** est un capteur permettant de convertir un déplacement mécanique en un signal numérique. Il utilise un disque avec des fentes correspondant à l'angle en code binaire. Ces fentes permettent à la lumière d'une LED de traverser le disque et d'atteindre un photodétecteur. Le signal est reçu par un microcontrôleur qui va le convertir en une position angulaire<sup>2</sup>.

Exxelia conçoit et fabrique les codeurs qui sont intégrés dans des collecteurs.

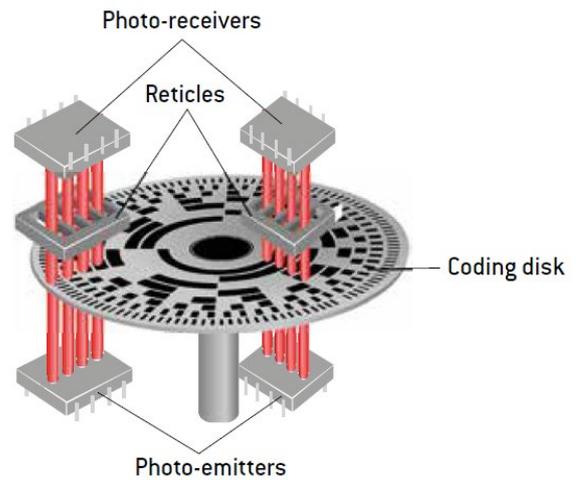


Figure 3 Un codeur optique absolu<sup>2</sup>

### 3.3 Joint rotatif hydraulique

Un **joint rotatif hydraulique** est un type de joint qui permet de faire circuler un fluide entre une partie fixe et une partie mobile. Il se compose d'un châssis fixe et d'un rotor interne qui est entraîné par la partie mobile. Des joints d'étanchéité sont positionnés pour empêcher les fuites de fluide. Le fluide entre dans le joint par une entrée fixe, passe à travers des canaux internes, et sort par une sortie connectée à la partie en rotation.



Figure 4 Joint rotatif hydraulique

<sup>2</sup> Exxelia group, « Electromechanical solutions », 2016, <https://exxelia.com/uploads/PDF/59ad33d6e8bc2.pdf>.

## IV. Synoptique des règles de conception des collecteurs tournants

### 1. Les briques technologiques

Pour commencer ce projet, il est crucial de déterminer les différentes « briques technologiques » qui composent un collecteur tournant et les différentes options disponibles pour chaque brique technologique. On va définir ce que sont une brique technologique et une règle de conception.

#### 1.1 Qu'est-ce qu'une brique technologique

Une brique technologique correspond à chacune des **caractéristiques** et à chacune des **fonctions** d'un collecteur tournant. Un collecteur tournant est donc composé d'une multitude de briques technologiques.

Ces caractéristiques sont des propriétés géométriques (dimensions, forme), des propriétés physiques (matière), et des procédés industriels (traitement de surface, ordre de fabrication).

Ces fonctions permettent de satisfaire les besoins fonctionnels du produit.

#### 1.2 Qu'est-ce qu'une règle de conception

Une règle de conception est un **outil** qui va permettre de préciser les caractéristiques et les fonctions de chaque brique technologique. Cela se présente sous forme d'équations, d'abaques, de documents guides, de logigrammes, etc.

#### 1.3 Les différentes briques technologiques

Nous avons à notre disposition une base de données regroupant une grande partie des références de collecteurs tournants développés par Exxelia.

N° CT	Fait	Caractéristiques mécaniques							caractéristique moyen et électrique						
		Vitesse Max (RPM)		Accélération angulaire (Rad/s²)		Durée de vie Requis ou Qualifié (X 10 <sup>6</sup> )			Options	Courant (A)	Tension (U)	Hors standard (Dia Inter x dia exte piste)	Hors standard (type contacts)	µ Compact (Pistes Ø6xØ8)	Compact (Pistes Ø8xØ9)
		Estimé	Mesuré	Estimé	Mesuré	Estimé	Mesuré	Validation							
N° CT	Fait	Vitesse Max (RPM)	Vitesse Max (RPM)	Accélération angulaire	Accélération angulaire	Durée de vie Requis ou	Durée de vie Requis ou	Durée de vie Requis ou	Options	Courant	Tension	Hors standard	Hors standard	µ Compact (Pistes)	Compact (Pistes)
1000		1000	1000	1000	1000	1000	1000								
1001		1000	1000	1000	1000	1000	1000								
1002		1000	1000	1000	1000	1000	1000								
1003		1000	1000	1000	1000	1000	1000								
1004		1000	1000	1000	1000	1000	1000								
1005		1000	1000	1000	1000	1000	1000								
1006		1000	1000	1000	1000	1000	1000								
1007		1000	1000	1000	1000	1000	1000								
1008		1000	1000	1000	1000	1000	1000								
1009		1000	1000	1000	1000	1000	1000								
1010		1000	1000	1000	1000	1000	1000								

Figure 5 Base de données collecteur fichier interne

Nous pouvons trouver dans cette base de données :

- Projet (client, domaine, application, concepteur...)
- Options possibles (FORJ, codeur optique, joint hydraulique)
- Paramètres du cahier des charges (dimension, interface électrique, masse, vitesse, durée de vie...)
- Caractéristiques du moyeu (diamètre, nombre de pistes, courant, tension, traitement de surface...)
- Caractéristiques environnementales (température de fonctionnement, vibration, choc, étanchéité, altitude...)

Nous avons dans ce tableau une partie des briques technologiques que compose un collecteur. Cette base de données n'étant pas exhaustive, on fait une analyse plus poussée sur plusieurs collecteurs afin d'extraire d'autres choix technologiques en les comparant et en analysant les conceptions détaillées des produits.

Nous réalisons ensuite une compilation de l'ensemble des briques technologiques d'un collecteur : celles de la base de données et celles trouvées par l'analyse des produits.

CONFIDENTIEL

## 1.4 Propriétés des briques technologiques

### 1.4.a Matières des brins

Les collecteurs utilisent principalement une matière A, mais peuvent dans des cas particuliers utiliser une matière B.

### 1.4.b Diamètre des brins

Nous utilisons différents diamètres de brins, qui varient en fonction des configurations techniques, que ce soit en mono ou en multibrins. Le choix du diamètre est adapté selon les exigences spécifiques du projet.

### 1.4.c Longueur des brins

La longueur des brins doit être suffisante pour permettre le contact du brin sur la piste.

### 1.4.d Le type de brins

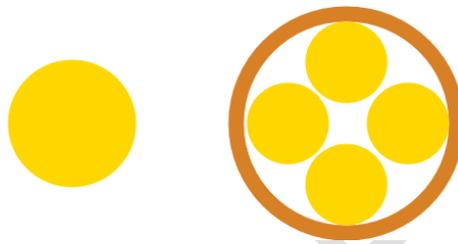


Figure 6 Type de brins mono à gauche et multi à droite

Si le collecteur est en monobrin, il n'y a pas besoin de polymère. Si le collecteur est en multibrins, les brins sont maintenus par un polymère. Le multibrin a l'avantage de réduire les microcoupures liées aux chocs. En effet, puisqu'un plus grand nombre de brins est en contact avec la piste, il y a moins de risque que le contact soit rompu. L'usure est réduite, car dispersée sur plusieurs brins.

### 1.4.e La géométrie des supports brins

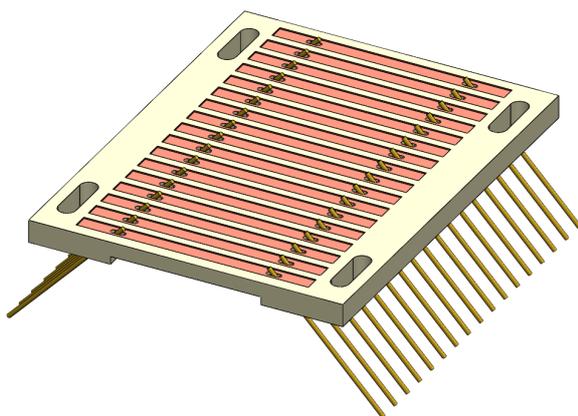


Figure 8 Support brins classique

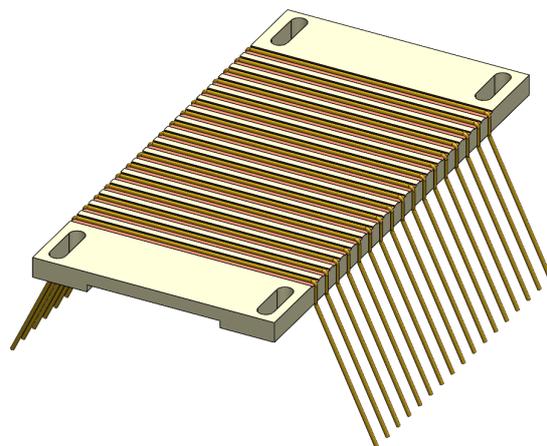


Figure 7 Support brins épingle

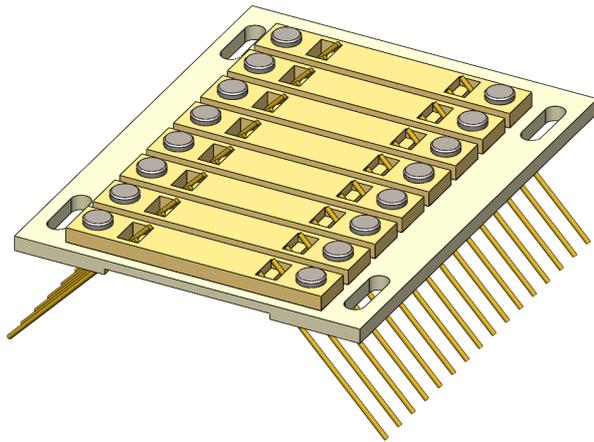


Figure 9 Support brins puissance

Il existe trois familles de support brins :

- Un support brins classique qui possède des trous dans lesquels nous faisons passer les brins que l'on brase sur la surface. On obtient deux rangées de brins, une de chaque côté du contact du moyeu.
- Un support brins épingle qui va supporter un seul brin par rangée. Chaque brin est monté en épingle (en forme de U) et brasé directement sur la surface du support brins. Ce montage a l'avantage d'avoir un encombrement réduit. Le défaut est qu'il est plus fragile et difficilement réalisable sur des moyeux de gros diamètre.
- Un support brins puissance possédant des plaques conductrices rivetées sur celui-ci. Ces plaques permettent de faire circuler de fortes puissances.

#### 1.4.f Traitement de surface des pistes

Les pistes subissent un traitement de surface qui durcit la couche supérieure et augmente sa conductivité pour une meilleure résistance au frottement.

Il existe trois différents traitements de surface pour les pistes. Leur composition ne seront pas détaillées ici pour des raisons de confidentialité.

Le traitement A est le standard utilisé dans quasiment tous les cas.

Le traitement B est principalement utilisé pour sa grande durée de vie.

Le traitement C est un ancien traitement utilisé pour les produits lambda ; il a été remplacé par le traitement A.

#### 1.4.g Épaisseur des pistes

L'épaisseur des pistes varie entre 0.2 mm et 1 mm.

### 1.4.h Géométrie des pistes

Lorsque nous brasons les fils sur la piste, nous utilisons principalement trois géométries qui diffèrent selon le diamètre intérieur de la piste et celui de la section du fil :



Figure 10 Piste sans oreille

Les pistes sans oreille sont surtout utilisées sur les petits moyeux où l'espace est très limité.

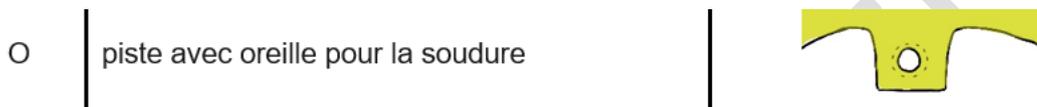


Figure 11 Piste avec oreille

Les pistes avec oreille ont l'avantage de braser leurs fils dans un perçage qui donne de la robustesse à la liaison pour une surface de contact plus élevée avec les fils.

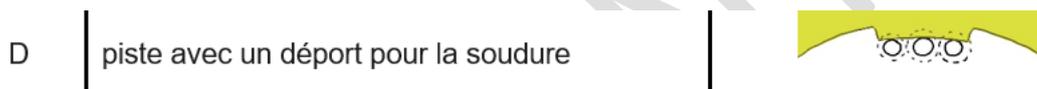


Figure 12 Piste avec déport

Les pistes avec déport sont utilisées pour éviter que la gaine ou la protection des fils vienne interférer lors de l'empilage des pistes.

### 1.4.i Nombre de pistes

Le nombre de pistes est donné par l'addition des pistes et des pistes de réserves.

### 1.4.j Angle de piqûre

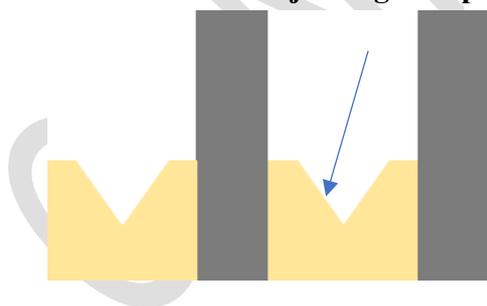


Figure 13 Angle de piqûre d'un moyeu

L'angle de piqûre est l'angle dans lequel les brins viennent se positionner lorsqu'ils sont en contact avec la piste. Nous avons deux angles possibles  $A^\circ$  et  $B^\circ$ . Le choix est fait en fonction du type de brins :  $A^\circ$  lorsque nous avons du multibrin, et  $B^\circ$  sur le monobrins.

#### 1.4.k Type de contact

Le type de contact est la méthode de liaison entre le stator et le rotor. Dans la plupart des cas, nous utilisons des brins. Mais dans le cas où nous devons faire passer une puissance plus importante, nous optons pour un contact à charbon ; ce charbon est maintenu le long d'une piste plan à l'aide d'un ressort de compression. Cette méthode permet l'acheminement de fortes puissances au détriment d'un volume important, d'une usure plus rapide et d'un coût relativement élevé.

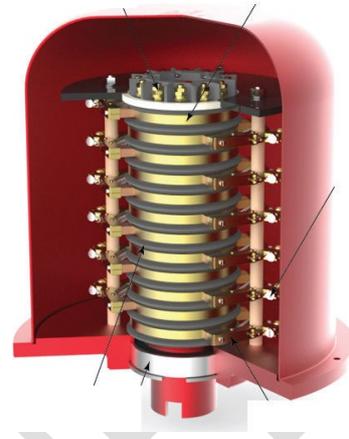


Figure 14 Vue en coupe d'un collecteur tournant à charbons

#### 1.4.l Diamètre des fils

Le diamètre des fils est défini par la désignation américaine « American Wire Gauge » (AWG). La plage possible de gauge représente la section du conducteur, et donc la capacité de transport du courant.

#### 1.4.m Pression de contact

La pression de contact est l'effort attribué au brin lorsqu'il est en contact avec la piste. Cet effort est défini par le bras de levier induit par l'angle entre les brins et le support brins.

#### 1.4.n Processus de réalisation du moyeu

Nous avons deux processus pour assembler le moyeu :

- Empilé puis usiné : on résine les pistes et les isolants. On pique le moyeu, puis on traite chimiquement les pistes.
- Usiné puis empilé : on pique individuellement les pistes pour faire une gorge en forme de V. On traite ensuite chimiquement les pistes, puis on les résine avec les isolants.

La grande différence entre ces deux méthodes est la concentricité accrue sur le processus « empilé puis usiné » par rapport au processus « usiné puis empilé ». Mais au moindre problème dans le processus « empilé puis usiné », le moyeu en entier doit être jeté, car les reprises sont impossibles, alors que dans le processus « Usiné puis empilé », on ne perd que la piste qui a été abîmée lors du traitement chimique.

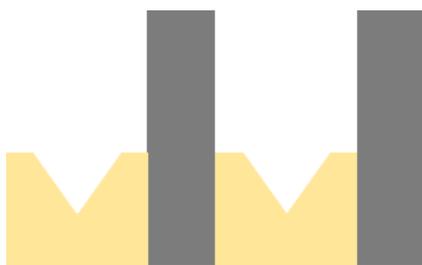


Figure 15 moyeu Usiné puis Empiler



Figure 16 Moyeu Empilé puis Usiné

#### 1.4.o Épaisseur d'isolant

L'épaisseur de l'isolant peut varier entre 0,1 mm et 2 mm.

#### 1.4.p Matière d'isolant

Nous avons principalement quatre matières d'isolants que l'on choisit en fonction du signal qui circule dans la piste, et en fonction du degré d'isolation nécessaire entre deux pistes.

#### 1.4.q Les pistes de réserve

Les pistes de réserve sont des pistes qui sont positionnées en haut et/ou en bas et/ou au milieu du moyeu. Elles sont utilisées lorsque l'on se rend compte qu'une piste est défectueuse.

#### 1.4.r Types de roulement

Les types de roulement définissent les groupes de roulement appliqués dans les collecteurs tournants en fonction des charges mécaniques. Nous utilisons les suivants :

- Roulement à quatre points de contact
- Roulement à contact oblique à une seule rangée
- Roulement rigide à une rangée de billes
- Roulement à cylindres

#### 1.4.s Hauteur de calage

La hauteur de calage est la hauteur de la cale employée pour maintenir les roulements.

#### 1.4.t Têtes de vis

Les têtes de vis ont différentes formes ; elles peuvent être hexagonales, torx, plates ou fraisées.

#### 1.4.u Longueur de prise sur filets

Cette longueur définit le nombre minimal de filets en prise sur un taraudage pour que le maintien des pièces mécaniques soit suffisant.

#### 1.4.v Côte d'empilage

Cette dimension caractérise la longueur du moyeu empilé. Elle correspond à :

$$\begin{aligned} & \text{Nombre de piste} * \text{épaisseur de piste} + \text{nombre d'isolants} * \text{épaisseur isolant} \\ & = \text{côte d'empilage} \end{aligned}$$

### 1.5 Corrélation de chaque brique avec le cahier des charges

Nous commençons par extraire les paramètres les plus prépondérants de plusieurs cahiers des charges. Nous avons :

- Vitesse de rotation
- Coût
- Bruit de contact
- Durée de vie
- Encombrement
- Choc
- Courant
- Tension
- Température
- Vibration

On conçoit un tableau de dépendance dans lequel on met notre liste de briques technologiques en ordonnée, et les différents paramètres du cahier des charges en abscisse. On étudie les briques pour déterminer les paramètres les plus influents.

brique technologie	vitesse	cout	bruit	durée de vie	encombrement	choc	courant	tension	temperature	vibration	Comm
Type de moyeux											1
type de dorure											2
type de brin											3
matiere brin											4
épaisseur d'isolant											5
matière isolant											6
geometrie des supports brins											7
type de contact											8
geometrie des piste											9
Øbrins											10
Øfils											11
Angle de picure											12
ep de piste											13
Nb de piste											14
Pression de contact											15
longueur de brins											16
reserve de piste											17
type de roulement											18
hauteur de calage											19
plaque de puissance											20
tête de vis											21
longueur de prise sur filet											22

Figure 17 Tableau de dépendance brique technologique et cahier des charges

Pour continuer l'analyse et avoir une idée des valeurs de chaque paramètre, on peut les recouper avec la base de données de nos produits. Cette base de données n'étant pas exhaustive, nous allons rajouter des colonnes pour chaque paramètre manquant (tension, bruit...). On extrait les paramètres manquants depuis les fiches techniques de chaque produit afin de compléter la base de données.

De cette base de données, on peut extraire une plage de valeurs pour chacune des briques technologiques. Cela sera utile pour la réalisation de notre guide de conception.

		Endurance	bruit en mohm	cout	nombre de produit
type de dorure	traitement A	-/++	-/++	+++	48
	traitement B	+ /+++	-/++	++	12
	traitement C	+ /++	++	+	5
		Endurance	vitesse	courant	nombre de produit
type de brin	mono brins	- /+++	- /++	- /++	60
	multi brins	+ /+++	- /+++	- /+++	17
		Endurance	bruit	vitesse	nombre de produit
matière brin	matières A	- /+++	- /+++	- /+++	68
	matières B	+	+	+ /++	4
	matières C	+	+	+	1

Figure 18 Données du cahier des charges pour chacun des choix de briques

## 2. Analyse de l'interdépendance des briques technologiques entre elles

Il est important de noter que certaines caractéristiques du design n'ont pas de lien direct avec le cahier des charges. Toutes les briques sont interdépendantes.

La longueur des brins, par exemple, est définie à partir de la distance entre le support des brins et le diamètre du moyeu. Cette longueur doit être suffisante pour permettre le positionnement du brin sur la piste et garantir le contact.

Sur cette question, nous avons interrogé les quatre ingénieurs en charge de la conception pour connaître leur organigramme personnel. Chacun de ces organigrammes est différent d'un ingénieur à un autre, car chacun a une manière différente de concevoir.

Ci-dessous :

- L'organigramme de Julien Dessalles. Les trois autres organigrammes sont disponibles en annexe.
- Un organigramme synthétisant ces quatre diagrammes.
- Un organigramme de synthèse incluant les paramètres du cahier des charges et les informations de non-compatibilité des briques entre elles.

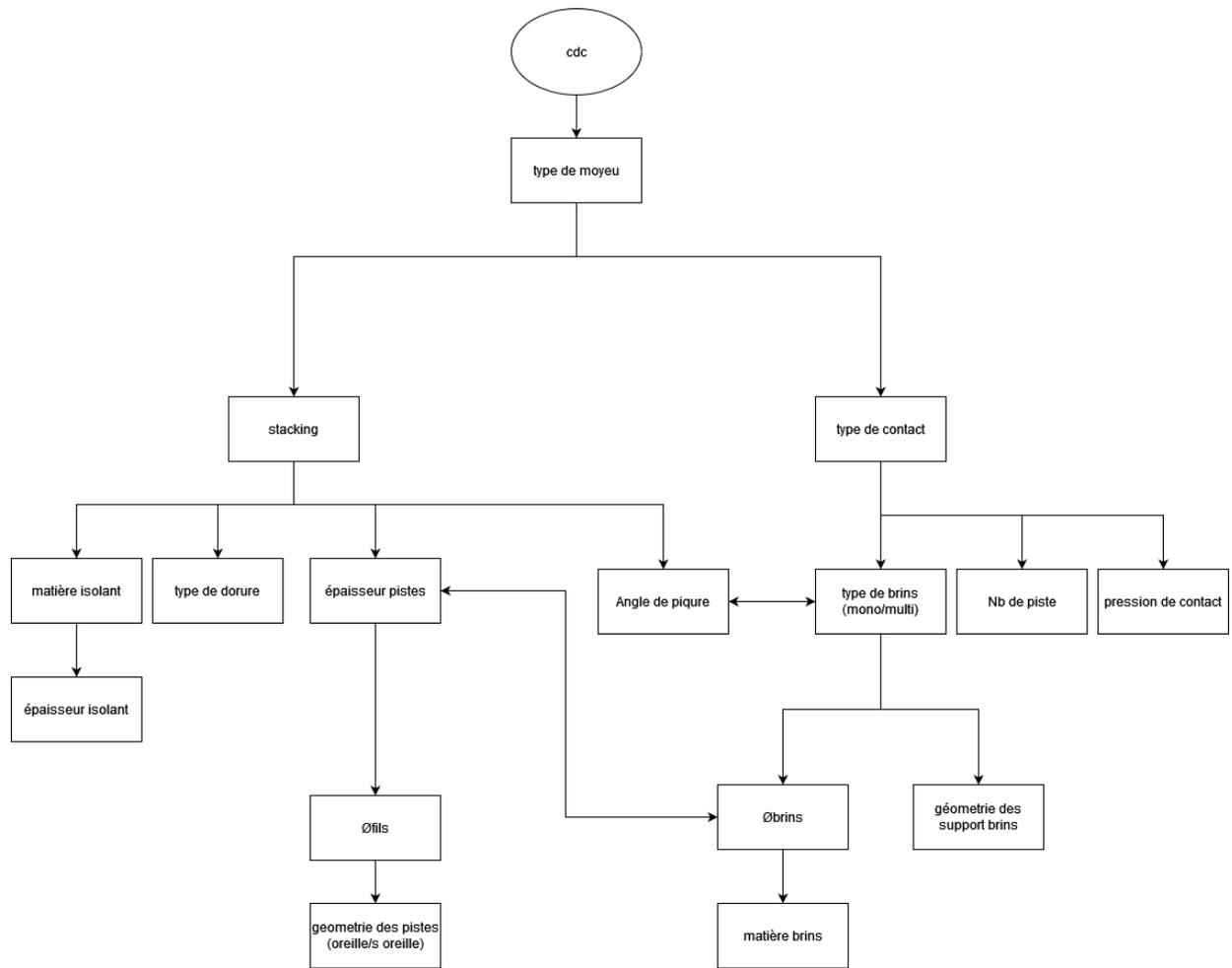


Figure 19 Organigramme de Julien Dessalles

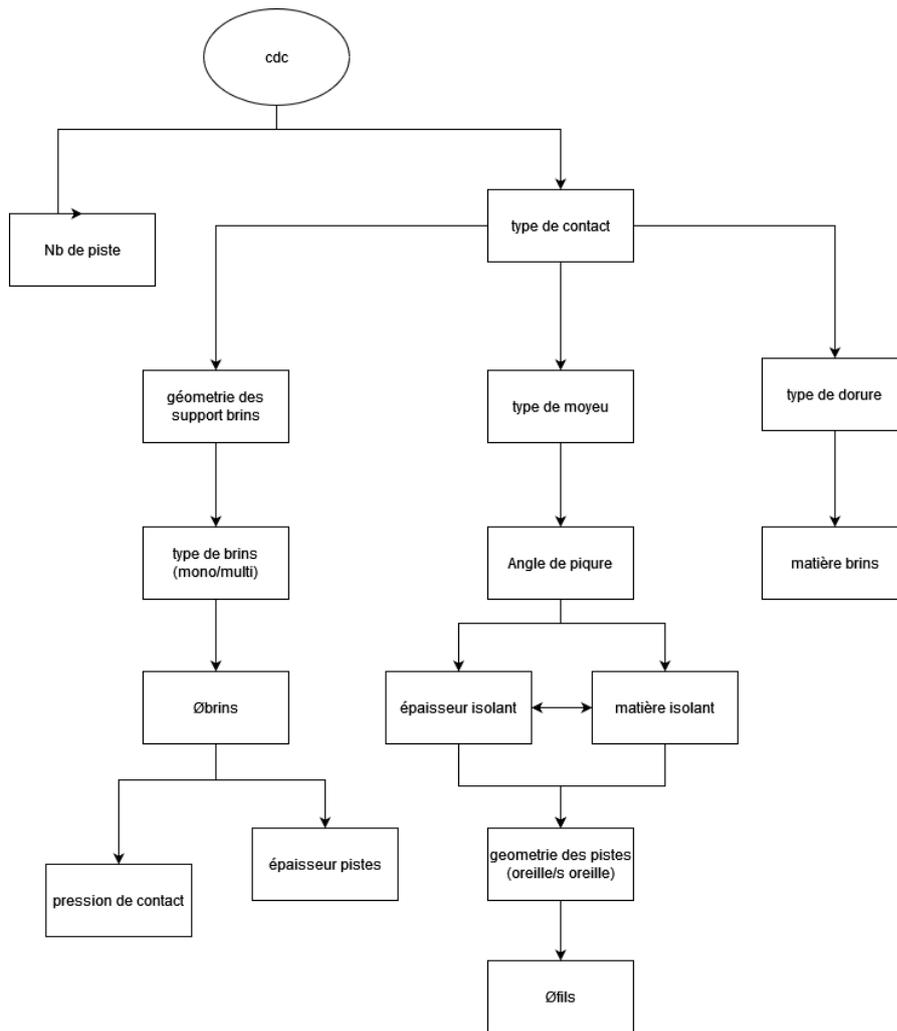


Figure 20 Organigramme général regroupant les quatre organigrammes

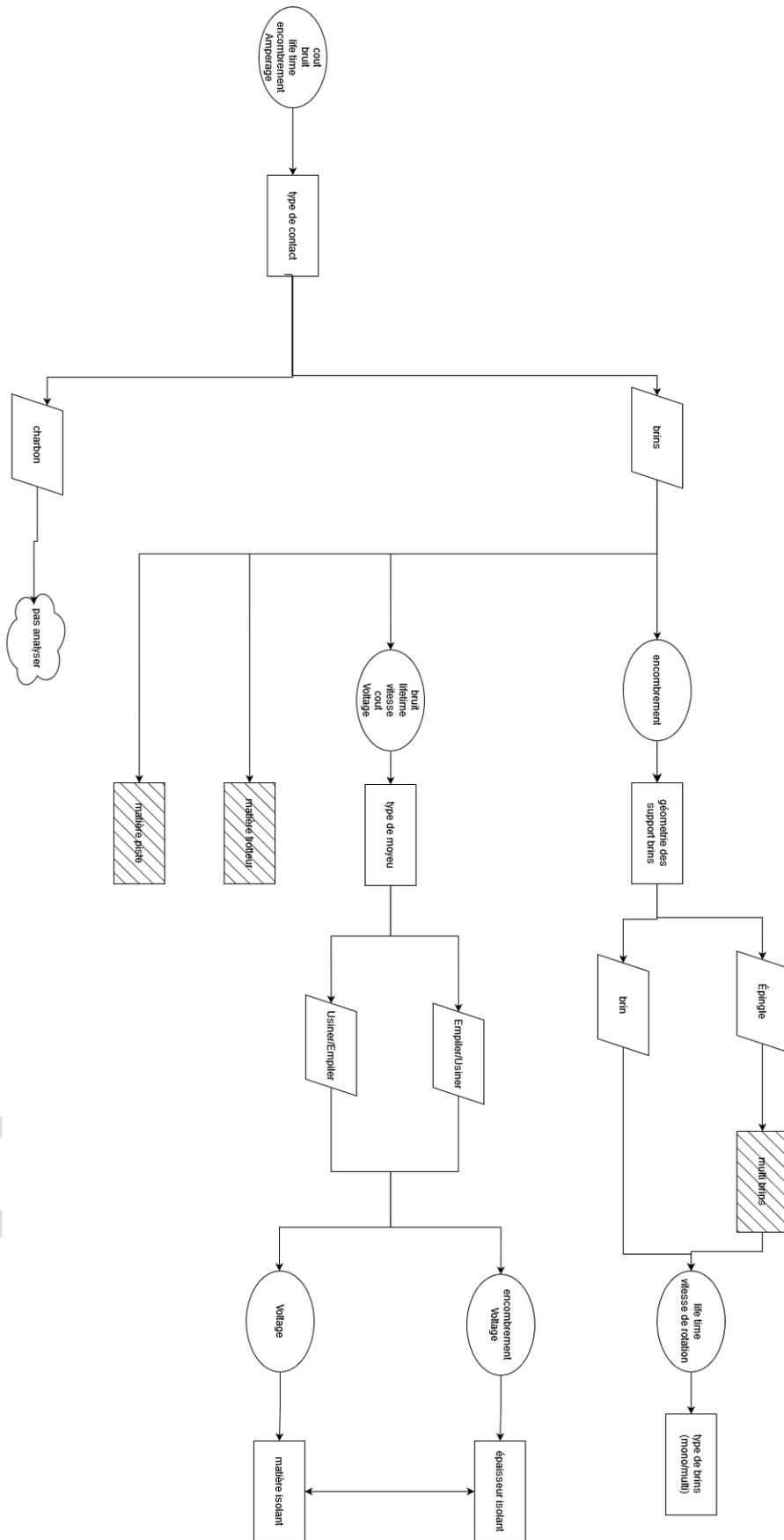


Figure 21 partie de l'organigramme avec compatibilité

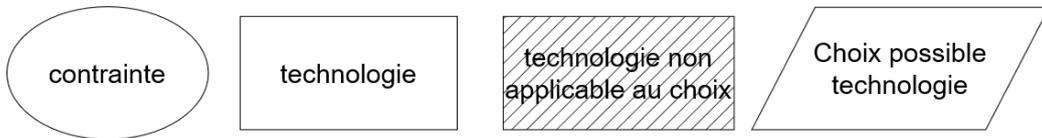


Figure 22 Légende organigramme avec compatibilité

Cet organigramme se lit de gauche à droite. Chaque ellipse indique les données du cahier des charges utilisées pour faire le choix de la brique technologique désigné par un rectangle. À la suite de la brique technologique, différentes déclinaisons sont décrites.

Pour le type de contact, on a deux choix possibles : brin ou charbon.

Dans la continuité de ces choix de briques technologiques, il y a deux possibilités : soit d'autres contraintes qui vont venir définir une nouvelle brique, soit une non-compatibilité entre deux briques qui seront alors signalées par un rectangle hachuré.

### 3. Création d'un logigramme complet de conception

On crée un logigramme reprenant toutes ces contraintes : corrélation des briques avec le cahier des charges, dépendance des briques les unes par rapport aux autres, options (FORJ, Codeur...).

Les données extraites de la base de données vont servir de point de départ à la création de ce logigramme.

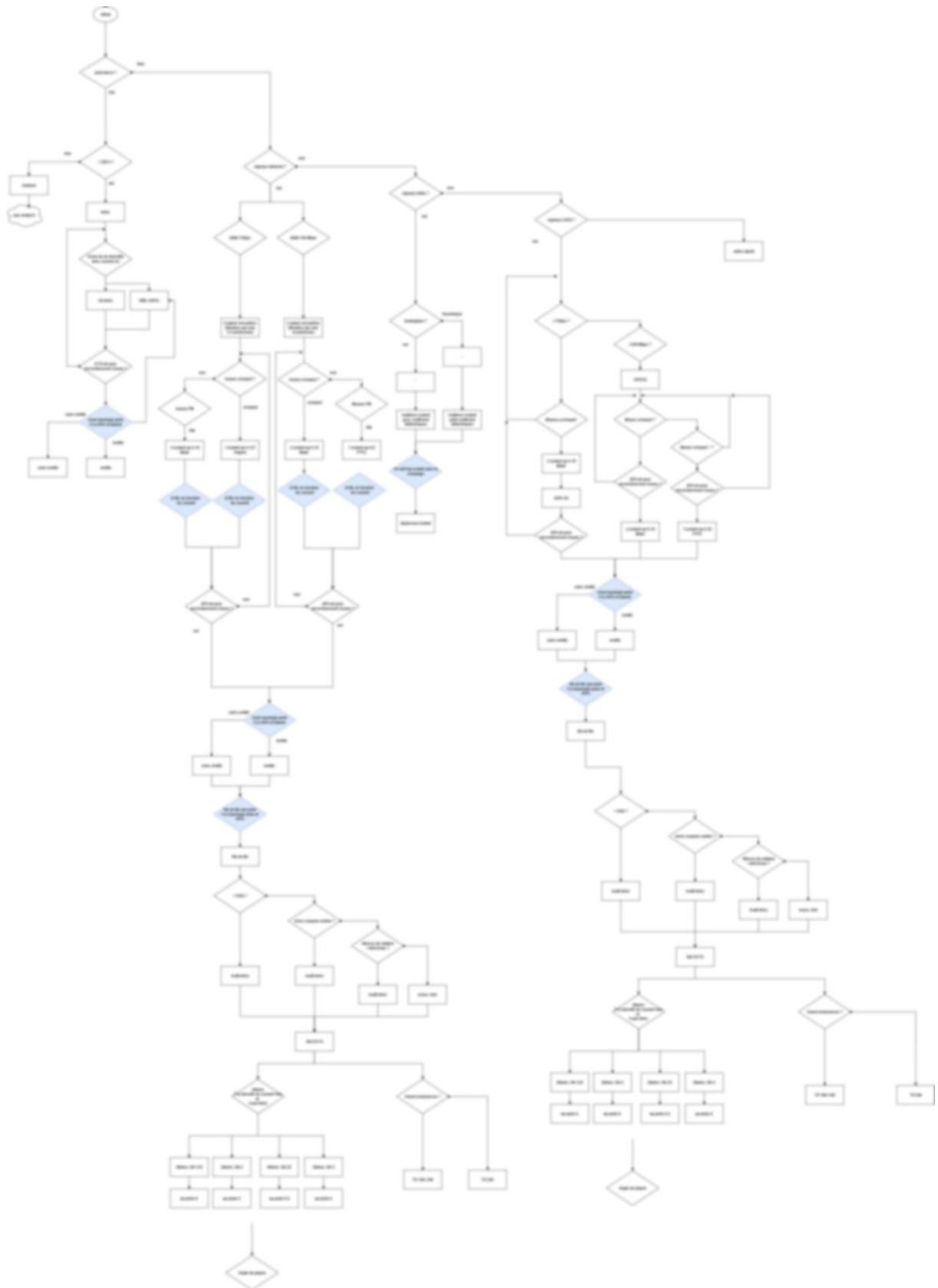


Figure 23 Logigramme de conception - vue générale

Le logigramme ci-dessus a pour objectif de guider le concepteur lors de la réalisation d'un nouveau produit. Il permet d'avoir une méthodologie simple puisqu'il suffit de répondre aux différentes questions. Il va permettre de déterminer une par une les briques technologiques. Chaque losange bleu correspond à une règle de conception totalement définie.

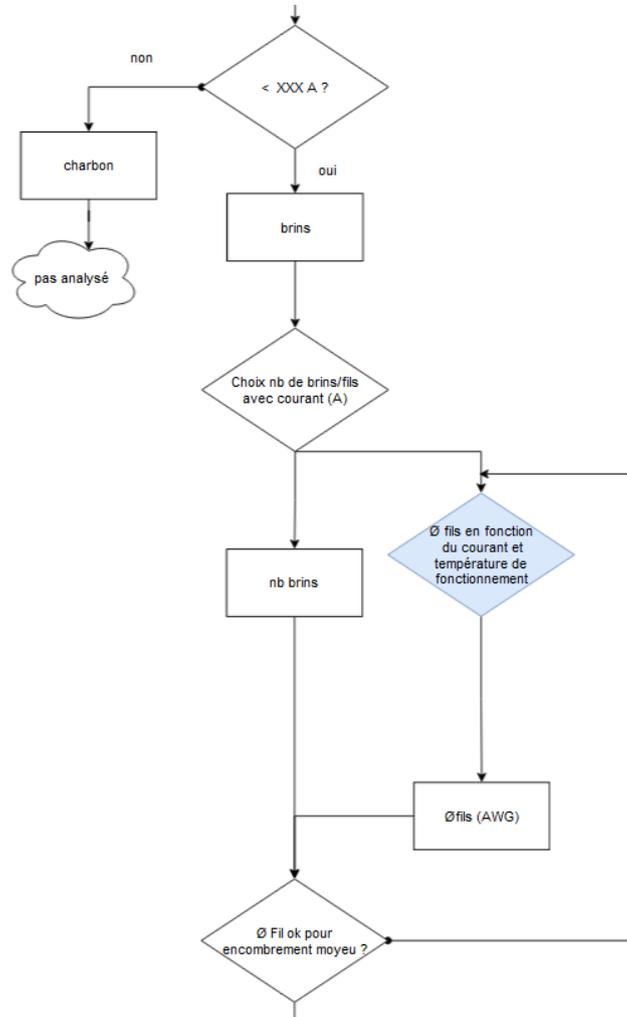


Figure 24 Zoom sur le logigramme partie puissance

Ce logigramme se lit de haut en bas.

Nous avons une première question : est-ce que notre signal est supérieur à XX ampères ? Si nous avons moins de XX ampères, nous sommes en brins.

Nous avons ensuite la règle de conception qui définit le nombre de brins avec le courant.

Nous avons en parallèle la règle de conception du diamètre des fils en fonction du courant.

On se pose ensuite la question de savoir si le diamètre de fils peut être contenu dans l'encombrement. Si ce n'est pas le cas, nous devons adapter le diamètre des fils.

Cette méthodologie a pour objectif d'être le plus claire et accessible possible. Un ingénieur n'ayant jamais travaillé sur le design de collecteur peut avoir une vue globale grâce à cet outil.

### 3.1 Règles de conception déjà existantes

Avec la liste de toutes les dépendances, nous identifions les règles existantes ou partielles afin de créer celles qui manquent. Pour les règles manquantes, les ingénieurs se basent sur l'expertise des anciens, d'où l'importance de capitaliser ce savoir-faire pour ne pas le perdre.

On crée un organigramme reprenant toutes les briques technologiques. On organise les briques par familles.

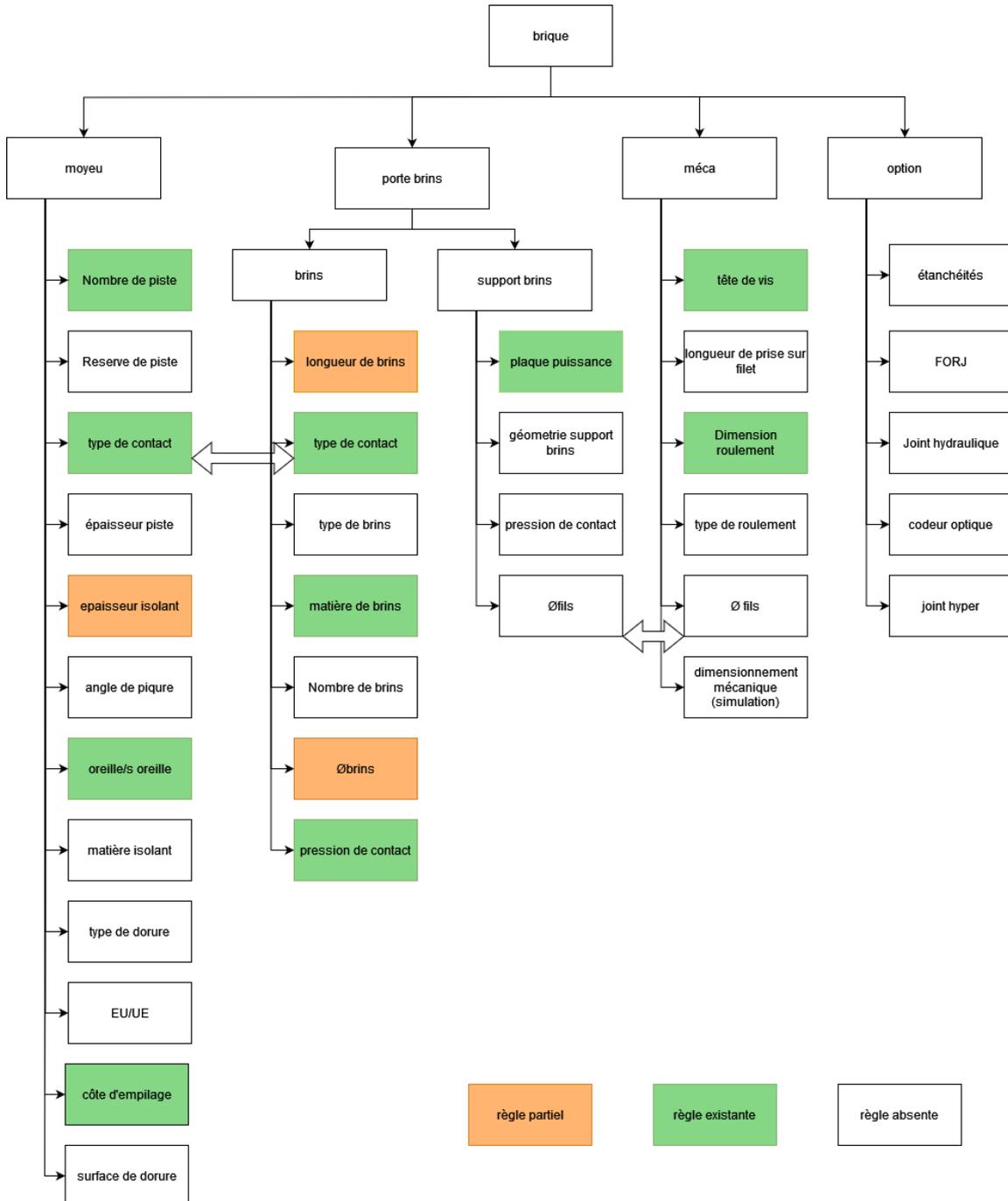


Figure 25 Liste des briques technologiques avec présence ou non de règle de conception

Nous analysons ensuite quelle brique technologique doit être en priorité caractérisée. Le diamètre du fil constitue un point critique. Actuellement, aucune règle de calcul standardisée n'existe. Chaque ingénieur utilise sa propre feuille de calcul. Cette règle est essentielle car un sous-dimensionnement du câble peut entraîner des risques de surchauffe, voire de combustion dans des cas extrêmes. À l'inverse, un surdimensionnement complique l'intégration des câbles à l'intérieur du moyeu, où l'espace est restreint. Le besoin de rédiger cette règle de conception est validé par le responsable du bureau d'études.

## 4. Règle de conception du diamètre des fils

L'objectif de cette partie est de créer un tableau qui détermine le courant maximal pour un échauffement donné.

La contrainte donnée par le bureau d'études est de concevoir un outil de calculs, facile à utiliser sur Excel, accessible et modifiable par les équipes d'ingénieurs, sans passer par l'utilisation d'un logiciel spécifique tel que MATLAB.

Pour réaliser ce calcul, nous nous basons sur deux normes : IEC 60287 et MIL STD 339. Nous appliquons ces normes aux différentes références de fils que nous utilisons dans nos produits. Nous utilisons principalement six références de fils :

- MIL-W 22759/32 ; 55A0111
- MIL-W 22759/34 ; 55A0811
- MIL-W-81044 ; 44A0111
- KZ04
- KZ05
- KZ06

### 4.1 Norme IEC 60287 : courant admissible dans les câbles

#### 4.1.a Équation principale

Il existe plusieurs normes qui permettent de définir l'échauffement en fonction d'un courant. La norme IEC 60287 intitulée « Calcul du courant admissible dans les câbles en régime permanent (facteur de charge 100%).<sup>3</sup> » est une norme internationale.

Plusieurs situations sont développées dans cette norme :

- Câble enterré sans assèchement du sol ou câble posé à l'air libre
- Câble enterré où il y a assèchement partiel du sol
- Câble enterré où un assèchement du sol est à éviter
- Câble directement exposé au rayonnement solaire

C'est le cas numéro 1 (câble posé à l'air libre) qui correspond à nos collecteurs tournants.

<sup>3</sup> « IEC 60287-1-1 calcul du courant admissible - partie 1-1: Equation de l'intensité du courant admissible (facteur de charge 100%) et calcul des pertes - généralités », 2001.

Pour un câble à courant continu jusqu'à 5 kV, d'après le paragraphe 1.4.1.2 de la norme IEC 60287, la formule est la suivante :

$$I = \sqrt{\frac{\Delta\theta}{R' T_1 + n R' T_2 + n R' (T_3 + T_4)}}$$

- I est l'intensité de courant circulant dans une âme (A)
- $\Delta\theta$  est l'échauffement de l'âme au-dessus de la température ambiante (°C)
- R' est la résistance de l'âme en courant continu, par unité de longueur, à sa température maximale de service ( $\Omega/m$ )
- $T_1$  est la résistance thermique par unité de longueur, de l'isolant entourant l'âme (K.m/W)
- n est le nombre d'âmes chargées dans le câble (âmes de même section et transportant la même charge)
- $T_2$  est la résistance thermique, par unité de longueur, entre la gaine et l'armure (K.m/W)
- $T_3$  est la résistance thermique, par unité de longueur, du revêtement extérieur du câble (K.m/W)
- $T_4$  est la résistance thermique, par unité de longueur, entre la surface du câble et le milieu environnant, telle que déduite de 2.2 de la partie 2 (K.m/W)

Pour calculer les différents termes de cette équation, nous avons besoin des données physiques et géométriques de nos fils qui sont obtenues auprès de notre fournisseur<sup>4 5 6 7</sup>.

Pour expliquer les différentes formules, nous les appliquons à titre d'exemple sur la section de fils AWG 26 de la MIL-W-81044 puisque cette référence de fils possède deux couches d'isolation (comme toutes nos références sauf la MIL-W-22759/32).

Nous prenons un câble seul posé à l'air libre sans rayonnement solaire. Nous voulons un échauffement maximal de 10 °C.

<sup>4</sup> Reychem, « SPECIFICATION CONTROL DRAWING 44A0111 », 2011.

<sup>5</sup> Reychem, « SPECIFICATION CONTROL DRAWING 55A0111 », 2011.

<sup>6</sup> Reychem, « SPECIFICATION CONTROL DRAWING 55A0811 », 2017.

<sup>7</sup> CAE industry, « Fiche technique KZ 04 KZ 05 KZ 06 », 2016.

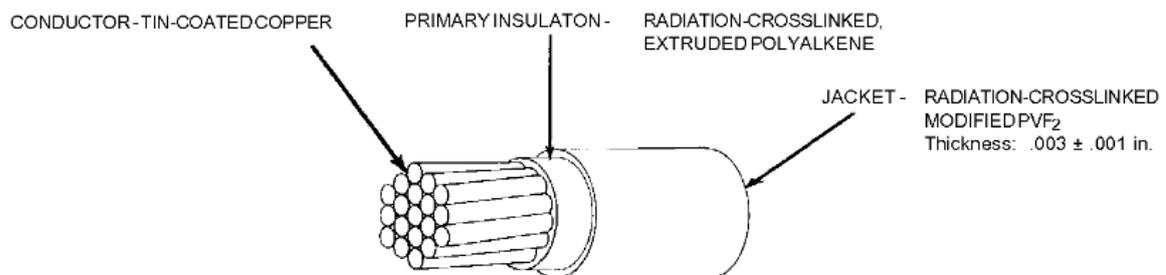
**4.1.b R' est la résistance linéique de l'âme, en courant continu, et à la température maximale de service**

Nous utilisons la formule détaillée dans le paragraphe 2.1.1 de la norme : résistance de l'âme en courant continu<sup>8</sup> :

$$R' = R_0[1 + \alpha_{20}(\theta - 20)]$$

- $R_0$  est la résistance de l'âme en courant continu à 20 °C ( $\Omega/m$ )
- $\alpha_{20}$  est le coefficient de variation à 20 °C de la résistivité en fonction de la température, par kelvin (voir *Figure 27 Tableau 1 - IEC 60287-1-1*  $\alpha_{20}$  pour les valeurs de référence)
- $\theta$  est la température maximale de service en degré Celsius. Celle-ci est déterminée d'après le type d'isolant utilisé (voir la spécification de la CEI appropriée ou les normes nationales)

On cherche à définir  $R_0$ , regardons la norme MIL-W-81044 :



PART NUMBER 1/	WIRE SIZE (AWG)	CONDUCTOR STRANDING (number x AWG)	DIAMETER OF STRANDED CONDUCTOR (in.)		FINISHED WIRE		
			MINIMUM	MAXIMUM	MAXIMUM RESISTANCE AT 20°C (ohms/1000 ft)	DIAMETER (in.)	MAXIMUM WEIGHT (lbs/1000 ft.)
44A0111-26-*	26	19 x 38	.018	.021	41.3	.034 ± .002	1.4
44A0111-24-*	24	19 x 36	.023	.026	26.2	.040 ± .002	2.0

Figure 26 Norme 44A0111 Reychem (norme MIL-W-81044)

Nous obtenons la résistance maximum de l'âme en courant continu en  $\Omega/1000$  pieds. Nous devons convertir ces unités en unités SI à l'aide de cette formule :

$$\frac{1}{304.8} * \frac{1}{1000} \left[ \frac{\Omega}{ft} \right] = \left[ \frac{\Omega}{m} \right]$$

Soit

$$R_0 = 0.135 \frac{\Omega}{m}$$

<sup>8</sup> « IEC 60287-1-1 calcul du courant admissible - partie 1-1: Equation de l'intensité du courant admissible (facteur de charge 100%) et calcul des pertes - généralités ».

Pour  $\alpha_{20}$  on utilise le tableau 1 de la IEC 60287-1-1

Matériaux	Résistivité ( $\rho$ ) ohm · m à 20 °C	Température coefficient ( $\alpha_{20}$ ) par K à 20 °C
a) <i>Âmes</i>		
Cuivre	1,7241 $10^{-8}$	3,93 $10^{-3}$
Aluminium	2,8264 $10^{-8}$	4,03 $10^{-3}$
b) <i>Matériaux de gaines et d'armure</i>		
Plomb et alliage de plomb	21,4 $10^{-8}$	4,0 $10^{-3}$
Acier	13,8 $10^{-8}$	4,5 $10^{-3}$
Bronze	3,5 $10^{-8}$	3,0 $10^{-3}$
Acier inoxydable	70 $10^{-8}$	Négligeable
Aluminium	2,84 $10^{-8}$	4,03 $10^{-3}$

NOTE Les valeurs se rapportant au cuivre constituant les âmes sont prises dans la CEI 60028.  
Les valeurs se rapportant à l'aluminium constituant les âmes sont prises dans la CEI 60889.

Figure 27 Tableau 1 - IEC 60287-1-1  $\alpha_{20}$

Dans toutes nos références, notre âme est produite en cuivre :

$$\alpha_{20} = 3.93 * 10^{-3}$$

Pour  $\theta$ , la norme du fil donne 150 °C comme température maximal de services

On peut calculer :

$$R' = R_0[1 + \alpha_{20}(\theta - 20)]$$

$$R' = 0.135[1 + 3.93 * 10^{-3}(150 - 20)]$$

$$R' = 0.20 \frac{\Omega}{m}$$

#### 4.1.c $T_1$ est la résistance thermique entre âme et gaine

Nous utilisons la formule détaillée dans le paragraphe 2.1.1.1 de la norme IEC 60287-2-1<sup>9</sup> :

$$T_1 = \frac{\rho_T}{2\pi} \ln \left( 1 + \frac{2 t_1}{d_c} \right)$$

- $\rho_T$  est la résistivité thermique de l'isolant (K.m/W)
- $d_c$  est le diamètre de l'âme (m)
- $t_1$  est l'épaisseur de l'isolant entre âme et gaine (m)

Pour définir  $\rho_T$ , il nous faut la résistivité thermique de l'isolant (K.m/W).

<sup>9</sup> « IEC 60287-2-1 calcul du courant admissible - partie 2: Résistance thermique -Section 1: Calcul de la résistance thermique », 1994.

Nous utilisons un isolant réalisé en PVDF. Selon la revue « Thermal properties of poly (vinilidene fluoride) in the temperature range from 25 to 210 °C »<sup>10</sup> la conductivité thermique est de 0,18 W/ (m. K). La résistivité thermique, qui est l'inverse de la conductivité thermique, se calcule en prenant un divisé par la conductivité thermique. Ainsi, pour l'ETFE, la résistivité thermique est de

$$\rho_T = 5.55 \text{ m. K/W}$$

$d_c$  est donnée par la *Figure 26 Norme 44A0111 Reychem (norme MIL-W-81044)*. On prend la moyenne du diamètre maximum et minimum soit :

$$d_c = 0.0195 \text{ pouce}$$

On convertit en mètre :

$$d_c = 0.0005 \text{ mètre}$$

$t_1$  est implicitement donnée par la *Figure 26 Norme 44A0111 Reychem (norme MIL-W-81044)* puisqu'elle correspond à :

$$2 t_1 = (\text{Ø extérieur} - 2 * 0.003) - \text{Ø conducteur}$$

Soit, dans notre cas d'un fil AWG 26, nous avons :

$$2 t_1 = (0.034 - 0.006) - 0.0195 = 0.0085 \text{ pouce}$$

$$2 t_1 = 0.00023 \text{ mètre}$$

Nous pouvons calculer :

$$T_1 = \frac{\rho_T}{2\pi} \ln \left( 1 + \frac{2 t_1}{d_c} \right)$$

$$T_1 = \frac{5.55}{2\pi} \ln \left( 1 + \frac{0.00023}{0.0005} \right)$$

$$T_1 = 0.33 \text{ K. m/W}$$

Dans notre cas, nous n'avons qu'une seule âme donc :

$$n = 1$$

<sup>10</sup> W.N. Dos Santos, C.Y. Iguchi, et R. Gregorio, « Thermal Properties of Poly(Vinilidene Fluoride) in the Temperature Range from 25 to 210 °C », *Polymer Testing* 27, n° 2 (avril 2008): 204-8, <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2007.10.005>.

#### 4.1.d $T_2$ est la résistance thermique entre gaine et armure (K.m/W)

Nous n'avons pas de gaine métallique dans les références de fils que nous utiliserons, donc

$$T_2 = 0$$

#### 4.1.e $T_3$ est la résistance thermique du revêtement externe (K.m/W)

Nous utilisons l'équation détaillée au paragraphe 2.1.3 de IEC 60287-2-1

$$T_3 = \frac{\rho_T}{2\pi} \ln \left( 1 + \frac{2 t_3}{D'_a} \right)$$

- $t_3$  est l'épaisseur du revêtement externe (m)
- $D'_a$  est le diamètre extérieur de l'armure (m)

Note – Pour les câbles non armés,  $D'_a$  est égal au diamètre extérieur du composant immédiatement dessous, c'est-à-dire une gaine, un écran ou un revêtement.

$t_3$  est explicitement donné par la *Figure 26 Norme 44A0111 Reychem (norme MIL-W-81044)* :

$$t_3 = 0.003 \text{ pouce}$$

Soit :

$$t_3 = 0.000076 \text{ mètre}$$

$D'_a$  n'est pas donné directement, on peut le calculer avec la formule suivante :

$$D'_a = (\text{\textcircled{Ø} extérieur} - 2 * 0.003)$$

$$D'_a = (0.034 - 0.006)$$

$$D'_a = 0.028 \text{ pouce}$$

$$D'_a = 0.0007 \text{ mètre}$$

Nous pouvons calculer  $T_3$  :

$$T_3 = \frac{\rho_T}{2\pi} \ln \left( 1 + \frac{2 t_3}{D'_a} \right)$$

$$T_3 = \frac{5.55}{2\pi} \ln \left( 1 + \frac{2 * 0.000076}{0.0007} \right)$$

$$T_3 = 0.081 \text{ K.m/W}$$

#### 4.1.f $T_4$ est la résistance thermique extérieure (K.m/W)

Nous utilisons l'équation détaillée au paragraphe 2.2.1.1 de la norme correspondant à un câble posé à l'air libre protégé du rayonnement solaire direct<sup>11</sup> :

$$T_4 = \frac{1}{\pi D_e^* h (\Delta\theta_s)^{1/4}}$$

Où :

$$h = \frac{Z}{(D_e^*)^g} + E$$

- $D_e^*$  est le diamètre extérieur du câble (m)
- $h$  est le coefficient de dissipation de chaleur obtenu à partir de la formule ci-dessus utilisant les valeurs appropriées des constantes  $Z$ ,  $E$  et  $g$  données au tableau 2 : ( $W/m^2(K)^{5/4}$ )
- $\Delta\theta_s$  est l'échauffement de la surface du câble par rapport à la température ambiante

Pour le calcul de  $(\Delta\theta_s)^{1/4}$  une méthode itérative est donnée :

$$(\Delta\theta_s)^{1/4}_{n+1} = \sqrt[4]{\frac{\Delta\theta + \Delta\theta_d}{1 + K_A (\Delta\theta_s)^{1/4}_n}}$$

- $\Delta\theta_d$  est le facteur tenant compte des pertes diélectriques dans le calcul de  $T_4$  pour les câbles posés à l'air libre
- $K_A$  est le coefficient  $K$  dans l'air

Il faut poser comme valeur initiale  $(\Delta\theta_s)^{1/4}_n = 2$  et l'on réitère le calcul jusqu'à ce que

$$(\Delta\theta_s)^{1/4}_{n+1} - (\Delta\theta_s)^{1/4}_n \leq 0.001$$

Sachant que nous sommes en courant continu, les pertes diélectriques ne sont pas applicables, donc:

$$\Delta\theta_d = 0$$

Le coefficient  $K_A$  :

$$K_A = \frac{\pi D_e^* h}{(1 + \lambda_1 + \lambda_2)} \left[ \frac{T_1}{n} + T_2(1 + \lambda_1) + T_3(1 + \lambda_1 + \lambda_2) \right]$$

<sup>11</sup> « IEC 60287-2-1 calcul du courant admissible - partie 2: Résistance thermique -Section 1: Calcul de la résistance thermique ».

- $\lambda_1, \lambda_2$  rapport utilisé des pertes totales dans les gaines métalliques et armures respectivement aux pertes totales des âmes

$\lambda_1, \lambda_2$  sont applicables uniquement en courant alternatif

Commençons par calculer h, le coefficient de dissipation.

N°	Installation	Z	E	g	Mode
1	Un seul câble <sup>1)</sup>	0,21	3,94	0,60	
2	Deux câbles jointifs horizontaux	0,29	2,35	0,50	
3	Trois câbles posés en tréfle	0,96	1,25	0,20	
4	Trois câbles jointifs horizontaux	0,62	1,95	0,25	
5	Deux câbles jointifs, verticaux	1,42	0,86	0,25	
6	Deux câbles espacés de Dc, verticaux	0,75	2,80	0,30	
7	Trois câbles jointifs, verticaux	1,61	0,42	0,20	
8	Trois câbles espacés de Dc, verticaux	1,31	2,00	0,20	

<sup>1)</sup> Les valeurs données pour «un seul câble» s'appliquent aussi à tous les câbles d'un groupe lorsqu'ils sont séparés horizontalement par un intervalle d'au moins 0,75 fois le diamètre extérieur du câble.

Figure 28 Tableau 2 - Valeur des constante Z, E, g pour des câbles à l'air libre

Dans notre exemple, nous n'avons qu'un seul câble, donc:

$$h = \frac{0.21}{(0.00086)^{0.6}} + 3.94$$

$$h = 18.40 \text{ W/m}^2(\text{K})^{5/4}$$

On peut calculer  $K_A$  et simplifier son expression car  $\lambda_1, \lambda_2$  sont applicables uniquement en courant alternatif et  $n = 1$

$$K_A = \pi D_e^* h [T_1 + T_3]$$

$$K_A = \pi 0.00086 * 18.4 [0.33 + 0.081]$$

$$K_A = 0.044$$

Nous pouvons commencer à déterminer  $(\Delta\theta_s)^{1/4}$

On calcule terme par terme jusqu'à ce que  $(\Delta\theta_s)^{1/4}_{n+1} - (\Delta\theta_s)^{1/4}_n \leq 0.001$

Commençons par le premier terme  $(\Delta\theta_s)^{1/4}_1$  :

$$(\Delta\theta_s)^{1/4}_1 = \sqrt[4]{\frac{\Delta\theta}{1 + K_A (\Delta\theta_s)^{1/4}_0}}$$

Soit, avec notre échauffement maximum de  $10^\circ\text{C}$  :

$$(\Delta\theta_s)^{1/4}_1 = \sqrt[4]{\frac{10}{1 + 0.044 * 2}}$$

$$(\Delta\theta_s)^{1/4}_1 = 1.741$$

On calcule le terme suivant  $(\Delta\theta_s)^{1/4}_2$  :

$$(\Delta\theta_s)^{1/4}_2 = \sqrt[4]{\frac{10}{1 + 0.044 * 1.741}}$$

$$(\Delta\theta_s)^{1/4}_2 = 1.746$$

$$(\Delta\theta_s)^{1/4}_2 - (\Delta\theta_s)^{1/4}_1 = 0.005$$

On calcule le terme suivant  $(\Delta\theta_s)^{1/4}_3$  :

$$(\Delta\theta_s)^{1/4}_3 = \sqrt[4]{\frac{10}{1 + 0.044 * 1.746}}$$

$$(\Delta\theta_s)^{1/4}_3 = 1.746$$

$$(\Delta\theta_s)^{1/4}_3 - (\Delta\theta_s)^{1/4}_2 = 10^{-4}$$

On peut appliquer la formule pour déterminer  $T_4$  :

$$T_4 = \frac{1}{\pi D_e^* h (\Delta\theta_s)^{1/4}}$$

$$T_4 = \frac{1}{\pi * 0.00086 * 18.40 * 1.746}$$

$$T_4 = 11.52 \text{ K.m/W}$$

Nous avons toutes les variables pour nous permettre de calculer le courant admissible :

$$I = \sqrt{\frac{\Delta\theta}{R' (T_1 + T_3 + T_4)}}$$

$$I = \sqrt{\frac{10}{0.20 * (0.33 + 0.081 + 11.52)}}$$

$$I = 2.04 \text{ A}$$

Nous savons donc que pour avoir un échauffement de l'ordre de 10 °C, il faudrait faire circuler dans le câble de AWG 26, un courant de 2.04 Ampères.

#### 4.2 Transposition dans une feuille de calculs

Pour réaliser notre feuille de calculs, nous commençons par intégrer dans notre tableau les données des fiches techniques de fils.

On les utilise pour calculer :

$$R', R_0, T_1, T_3 (\text{si nécessaire}), h, K_A, (\Delta\theta_s)^{1/4}_5, T_4 \text{ et } I$$

On calcule  $(\Delta\theta_s)^{1/4}_n$  à l'ordre 5 pour être certain que  $(\Delta\theta_s)^{1/4}_{n+1} - (\Delta\theta_s)^{1/4}_n \leq 0.001$ .

La synthèse de ces calculs, indiquant le courant maximum pour chaque section de fils (AWG) apparaîtra dans un tableau à part. Ces données varient en fonction de la norme indiquée dans la feuille de calculs.

On crée ensuite un graphique pour avoir un résultat plus facile à lire.

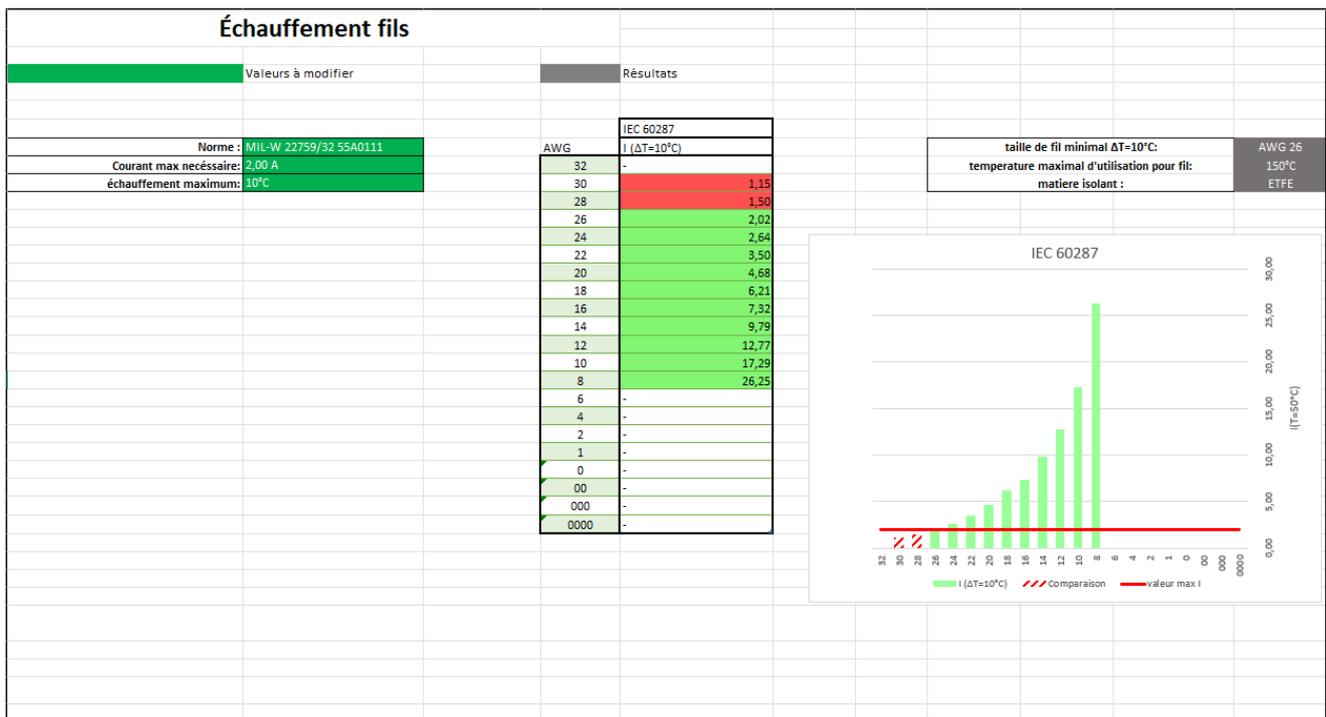


Figure 29 Premières version de la feuille de calcul

Nous avons créé un fichier qui permet de donner la taille d'un fil en fonction de l'échauffement de la norme du fil, du courant nécessaire et de l'échauffement maximal, mais pour l'instant il est applicable uniquement à un seul fil. Cette feuille de calculs ne s'applique qu'à un seul fil. Pour généraliser à plusieurs fils, il faut coupler la Figure 28 Tableau 2 - Valeur des constante Z, E, g pour des câbles à l'air libre – qui définit l'installation de un à trois câbles –, avec la partie 2 de la norme la IEC 60287-2-2<sup>12</sup> – qui définit des groupes de câbles.

Le principe énoncé dans la partie 2 de la norme la IEC 60287-2-2 est de remplacer le coefficient de dissipation de chaleur h, par le coefficient de dissipation de chaleur du câble le plus chaud d'un groupe  $h_g$  défini par :

$$h_g = \frac{h}{(h_i/h_g)}$$

<sup>12</sup> « IEC 60287-2-2 calcul du courant admissible - partie 2: Résistance thermique -Section 2: Méthode de calcul des coefficients de réduction de l'intensité de courant admissible pour des groupes de câbles posés à l'air libre et protégé du rayonnement solaire direct », 1995.

Avec  $h_l/h_g$  défini par le tableau suivant :

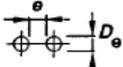
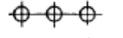
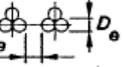
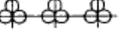
Disposition des câbles	Effet thermique de proximité négligeable si $e/D_e$ est plus grand ou égal à :	Effet thermique de proximité non négligeable	
		Si $e/D_e$ est inférieur à :	Valeurs moyennes de $h_l/h_g$ <sup>1), 2)</sup>
1	2	3	4
<b>Côte à côte</b>			
2 multipolaires 	0,5	0,5	1,41
3 multipolaires 	0,75	0,75	1,65
2 trèfles 	1,0	1,0	1,2
3 trèfles 	1,5	1,5	1,25
<b>L'un au-dessus de l'autre</b>			
2 multipolaires 	2	2 ou 0,5	$1,085 (e/D_e)^{-0,128}$ ou 1,35
3 multipolaires 	4	4 ou 0,5	$1,19 (e/D_e)^{-0,135}$ ou 1,57
2 trèfles 	4	4 ou 0,5	$1,106 (e/D_e)^{-0,078}$ ou 1,39
<b>Près d'une surface verticale ou d'une surface horizontale sous le câble</b> 	0,5	0,5	1,23

Figure 30 Données pour le calcul des coefficients de réduction pour des groupes de câbles

Notre positionnement de fils est un regroupement de câbles qui sont joints par des colliers de serrage. Or, dans les installations de câbles, nous n'avons pas d'option pour les câbles joints. Nous utilisons donc toujours le cas le plus défavorable pour se rapprocher le plus possible du cas étudié, à moins que l'on souhaite faire un calcul spécifique avec une association précise d'installation de câbles / disposition de câbles.

Sur notre feuille de calculs, on crée un tableau qui répertorie les cas les plus sévères pour chaque nombre de câbles. On crée aussi un jeu de deux listes déroulantes.

Il y a des associations installations de câbles qui ne sont pas compatibles avec des dispositions de câbles .

Nous créons des listes déroulantes en cascade en inscrivant les données de notre première liste en en-tête, et nous notons les compatibilités des groupes avec ces dispositions dans chaque colonne.

1 câble	2 câbles jointif horizontaux	3 câbles jointif horizontaux	3 câbles trèfle	2 câbles jointif verticaux
fonction de fils	fonction de fils	fonction de fils	fonction de fils	fonction de fils
un seul groupe	un seul groupe	un seul groupe	un seul groupe	un seul groupe
2 multipolaire cote	2 multipolaire dessus	2 multipolaire dessus	2 trèfle cote	2 multipolaire cote
3 multipolaire cote	3 multipolaire dessus	3 multipolaire dessus	3 trèfle cote	3 multipolaire cote
2 multipolaire dessus	près d'une surface vertical ou	près d'une surface vertical ou	2 trèfles dessus	près d'une surface vertical
3 multipolaire dessus			près d'une surface vertical ou	-
près d'une surface vertical ou d'une surfa	-			

Figure 31 Tableau de connectivité entre les dispositions et les groupes

Ces deux listes déroulantes permettent de calculer l'intensité pour une disposition donnée avec un groupe donné, ou bien de prendre le cas le plus défavorable qui est calculé automatiquement.

Pour réaliser le calcul du cas le plus défavorable, nous utilisons les fonctions SI d'Excel, dans lesquelles nous avons intégré les cas des associations d'installation et de disposition les plus critiques. La feuille de calculs va soit utiliser la valeur la plus critique – si la cellule d'entrée correspond à « fonction du fil » –, soit prendre la valeur de la cellule dans les autres cas.

Séparément, on va chercher, en fonction des valeurs des cellules, les constantes Z, E, g dans le tableau (Figure 28 Tableau 2 - Valeur des constante Z, E, g pour des câbles à l'air libre) donné par la norme. Dans nos références de fils, on rajoute une colonne pour calculer  $h_g$ . On va chercher ( $h_l/h_g$ ), dans le tableau des dispositions (Figure 30 Données pour le calcul des coefficients de réduction pour des groupes de câbles), en fonction de la cellule de disposition de câbles définie précédemment.

On obtient ce résultat :

Nombre de conducteur: 2	fonction du fil fonction du fil	2 câbles jointif horizontaux un seul groupe	(tableau 1): (tableau 2):	h z g e	variable 0,29 0,5 2,35
-------------------------	------------------------------------	--	------------------------------	------------------	---------------------------------

Figure 32 Cas sélection "fonction du fil"

Examinons l'impact du changement des valeurs des listes déroulantes en remplaçant par trois câbles posés en trèfle et trois trèfles disposés côte à côte.

Nombre de conducteur: 2	3 câbles trèfle 3 trèfle cote	3 câbles trèfle 3 trèfle cote	(tableau 1): (tableau 2):	h	variable
				z	0,96
				g	0,2
				e	1,25

Figure 33 Cas sélection "3 câbles trèfle" et "3 trèfles disposés côte à côte"

Nous avons bien Z, g, E qui correspondent à la Figure 28 Tableau 2 - Valeur des constante Z, E, g pour des câbles à l'air libre.

### 4.3. Résolution de la fonction de l'intensité de la IEC 60287-1-1

Dans cette partie, nous allons résoudre la fonction décrite par la norme IEC 60287-1-1 pour pouvoir injecter dans l'équation une intensité et ainsi obtenir un échauffement en donnée de sortie. Cela va nous permettre de voir la tolérance que nous avons par rapport à l'échauffement maximal.

L'équation est :

$$f(\Delta\theta) = I \Leftrightarrow g(I) = \Delta\theta$$

Correspondant à trouver les racines  $\Delta\theta$  de

$$f(I) - \Delta\theta = 0$$

On pose :

$$I = \sqrt{\frac{\Delta\theta}{R' (T_1 + T_3 + T_4)}}$$

On doit développer  $T_4$  car  $\Delta\theta$  est utilisé pour le calculer :

$$I = \sqrt{\frac{\Delta\theta}{R' (T_1 + T_3 + \frac{1}{\pi D_e^* h^4 \sqrt{\frac{\Delta\theta}{1+K_A (\Delta\theta_s)^{1/4} \theta_0}}}})}$$

Pour simplifier le calcul, nous prendrons  $(\Delta\theta_s)^{1/4}_0 = 2$

$$I^2 = \frac{\Delta\theta}{R' \left( T_1 + T_3 + \frac{1}{\pi D_e^* h \sqrt[4]{\frac{\Delta\theta}{1+2K_A}}} \right)}$$

$$I^2 R' \left( T_1 + T_3 + \frac{1}{\pi D_e^* h \left( \frac{\Delta\theta}{1+2K_A} \right)^{1/4}} \right) = \Delta\theta$$

$$I^2 R' \left( T_1 + T_3 + \frac{(1+2K_A)^{1/4}}{\pi D_e^* h \Delta\theta^{1/4}} \right) = \Delta\theta$$

$$I^2 R' \left( T_1 \Delta\theta^{1/4} + T_3 \Delta\theta^{1/4} + \frac{(1+2K_A)^{1/4}}{\pi D_e^* h} \right) = \Delta\theta^{5/4}$$

$$\Delta\theta^{5/4} - I^2 R' \left( \Delta\theta^{1/4} (T_1 + T_3) + \frac{(1+2K_A)^{1/4}}{\pi D_e^* h} \right) = 0$$

Pour résoudre ce polynôme nous devons trouver les racines d'une équation quintique.

D'après la théorie de Galois<sup>13</sup>, la plupart des polynômes de degré 5 ou supérieur ne sont pas solubles par radicaux, c'est-à-dire qu'il n'existe pas de formule générale utilisant uniquement les opérations élémentaires et les racines pour résoudre ce type de polynômes.

#### 4.4 Régression puissance sur la IEC 60287-1-1

Pour avoir une approche de cette solution, nous pouvons faire des nuages de points avec plusieurs échauffements de 0 à 190 °C pour chaque taille et référence de fils.

Nous avons besoin, pour chaque point, de recalculer :

- $(\Delta\theta_s)^{1/4}_n$
- $T_4$

Les autres paramètres n'ont pas besoin d'être recalculer puisque nous les avons déjà calculés précédemment et qu'ils ne varient pas suivant  $\Delta\theta$ .

Nous pouvons tracer notre courbe dans un tableau.

<sup>13</sup> Evariste Galois, « Mémoire sur les conditions de résolubilité des équations par radicaux » (1830).

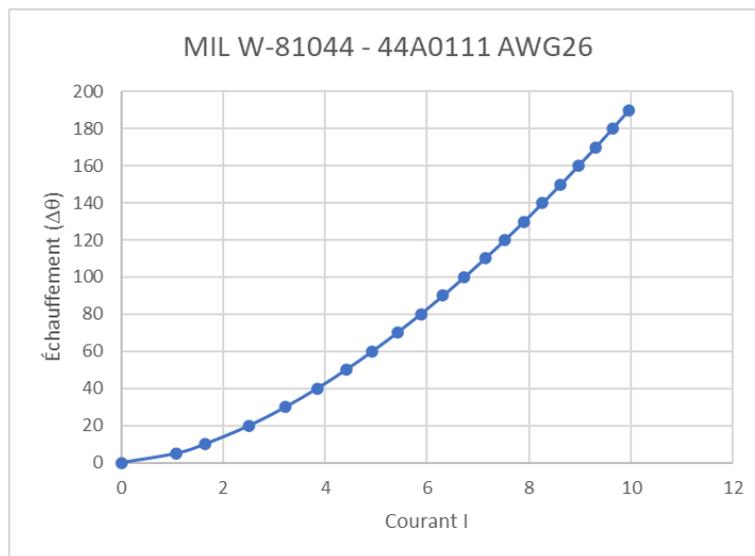
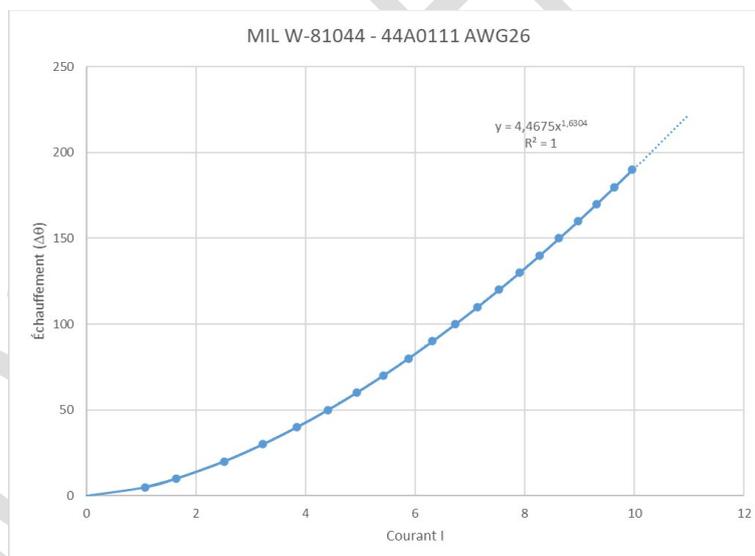


Figure 34 Nuage de point Courant en fonction de l'échauffement

Nous voyons que nos données sont totalement croissantes et nulles en zéro. Une régression puissance serait donc la plus adéquate pour nos données :

$$y = a * x^b$$



Nous obtenons par notre régression puissance les coefficients suivants a=4.468 et b=1.63 avec un coefficient de détermination de 1. C'est-à-dire que le delta entre notre nuage de points et la régression est nulle. Nous déterminons parfaitement tous nos points.

On étend notre tableau à toutes les tailles et références de fils, puis on réalise une régression puissance sur chaque taille de fils.

On crée une deuxième colonne dans chaque référence de fils dans laquelle on va utiliser les régressions puissance pour calculer un échauffement en fonction d'un courant.

		$I_{max}$	$I_{max 10^{\circ}C}$	Échauffement $\Delta\theta$ pour 2 A	AWG
teta 10°C	T4 10°C	-	-	-	-
-	-	-	-	-	30
-	-	-	-	-	28
1,741674604	11,49630908	9,85	1,98	10,17447844	26
1,740119816	10,55106442	12,87	2,59	7,005634904	24
1,739022115	9,671310639	17,05	3,43	4,10437429	22
1,737541217	8,871642825	22,72	4,58	2,547968503	20
1,735540633	8,080686606	29,85	6,03	1,622306359	18
1,734098863	7,624911453	34,86	7,05	1,244848112	16
1,729796861	6,748541438	46,03	9,35	0,775362025	14
1,725308183	6,020100143	59,40	12,12	0,500041144	12
1,722188795	5,402887795	78,87	16,15	0,308569877	10
-	-	-	-	-	8
-	-	-	-	-	6

Figure 35 Tableau de calculs MIL W-81044 avec calcul échauffement pour 2 A

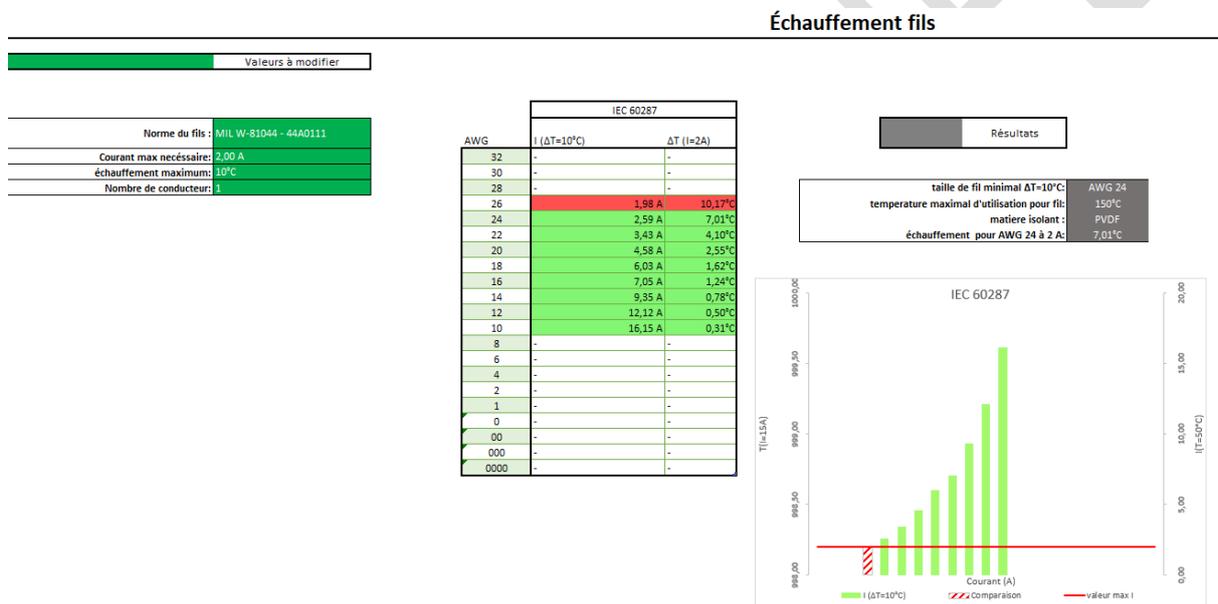


Figure 36 Feuille de calcul avec calcul par IEC 60287 et calcul par régression de la norme

Notre feuille de calculs est opérationnelle pour la norme IEC 60287.

Nous allons ajouter une deuxième norme de calculs d'échauffement : la norme MIL-STD-339. Il est important de noter que cette norme est plus adaptée aux applications mécaniques, tandis que la norme IEC 60287 est généralement utilisée dans le domaine de l'électricité générale.

Nous allons mettre en place cette norme puis nous regarderons la cohérence des valeurs obtenues entre ces deux normes.

#### 4.5 Norme MIL-STD-339: Wiring & wiring device for combat and tactical vehicles, selection and installation

Le principe de la norme MIL-STD-339 est un abaque qui donne, pour une taille de fils, plusieurs échauffements possible (80 °C, 90 °C, 105 °C, 125 °C, 200 °C) à une température ambiante de 30 °C<sup>14</sup>.

Size AWG #	Amperes per conductor				
	Copper temperature				
	80°C	90°C	105°C	125°C	200°C
30	2	3	3	3	4
28	3	4	4	5	6
26	4	5	5	6	7
24	6	7	7	8	10
22	8	9	10	11	13
20	10	12	13	14	17
18	15	17	18	20	24
16	19	22	24	26	32
14	27	30	33	40	45

Figure 37 Capacité de transport de courant des conducteurs en cuivre ; conducteur unique en plein air - température ambiante 30 °C partie 1

Size AWG #	Amperes per conductor				
	Copper temperature				
	80°C	90°C	105°C	125°C	200°C
12	36	40	45	50	55
10	47	55	58	70	75
8	65	70	75	90	100
6	95	100	105	125	135
4	125	135	145	170	180
2	170	180	200	225	240

Figure 38 Capacité de transport de courant des conducteurs en cuivre ; conducteur unique en plein air - température ambiante 30 °C partie 2

Dans ce tableau, on voit que l'écart de température n'est pas explicitement donné. On peut le calculer par

$$\text{Température maximale} - \text{Température ambiante} = \Delta\theta$$

Nous avons donc cinq échauffements : 50 °C, 60 °C, 75 °C, 105 °C, 170 °C. Malheureusement, ce n'est pas suffisant pour notre utilisation. Nous avons besoin d'un  $\Delta\theta$  plus petit et l'on veut pouvoir le faire varier à notre guise.

La norme propose un tableau de facteurs de correction pour des températures ambiantes différentes de 30 °C.

<sup>14</sup> « MIL-STD-339: military standard: wiring & wiring devices for combat and tactical vehicles, selection and installation », 1998.

°C	Correction factor				
	Conductor temperature				
	80°C	90°C	105°C	125°C	200°C
40	.88	.90	.92	.95	---
45	.82	.85	.87	.92	---
50	.75	.80	.82	.89	---
55	.67	.74	.78	.86	---
60	.58	.67	.73	.83	.91
70	.35	.52	.61	.76	.87
80	---	.30	.46	.69	.84
90	---	---	.30	.61	.80
100	---	---	---	.51	.77
120	---	---	---	---	.69
140	---	---	---	---	.59

Figure 39 Facteur de correction pour des températures ambiantes supérieures à 30 °C

Dans un premier temps, on va tracer ces facteurs de corrections dans un graphique pour voir s'il est possible de faire une régression et prolonger nos facteurs dans l'objectif de calculer des valeurs intermédiaires. Sur chaque plage de données, nous pouvons ajouter deux points :

- un point à la température ambiante de 30 °C où le facteur de correction est égal à 1.
- un deuxième point où la température ambiante est égale à la température du conducteur où le facteur de correction est égal à 0 puisqu'il n'y a plus de variation de température.

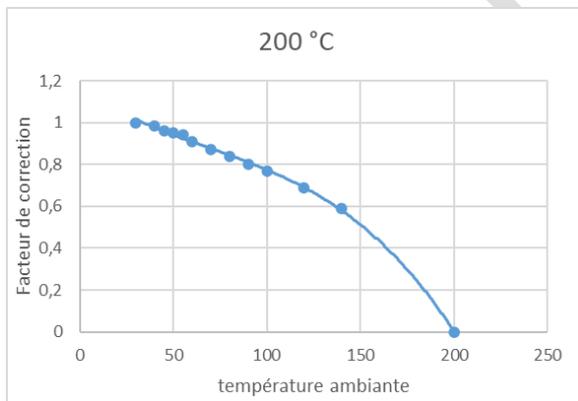


Figure 40 Tableau de facteur de correction pour une température d'âme de 200 °C avec régression

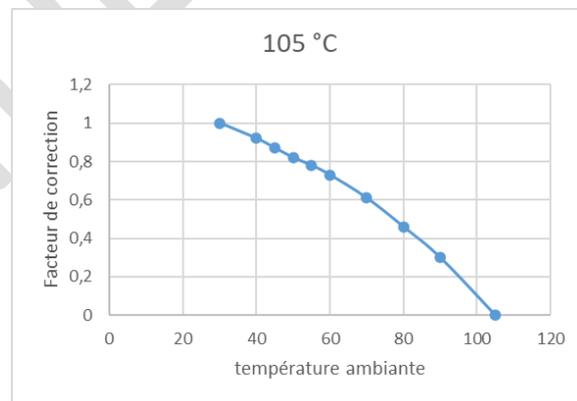


Figure 41 Tableau de facteur de correction pour une température d'âme de 105 °C avec régression

Nous voyons que nos facteurs sont décroissants et continus sur tout notre domaine. On va facilement pouvoir extrapoler les données avec une régression polynomiale d'ordre 2. Nous utilisons un polynôme d'ordre 2 pour éviter les problèmes d'effets de bord.

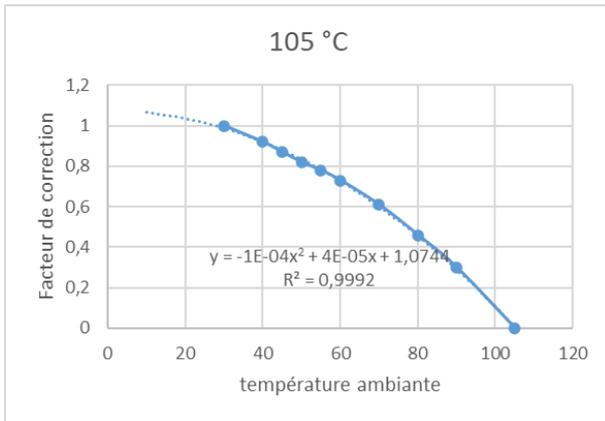


Figure 43 Tableau de facteur de correction pour une température d'âme de 105 °C avec régression

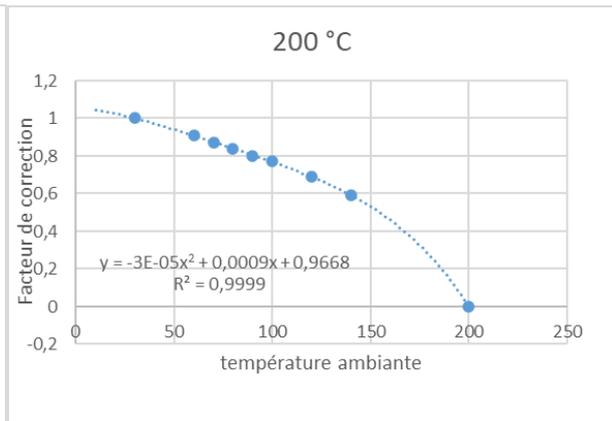


Figure 42 Tableau de facteur de correction pour une température d'âme de 200 °C avec régression

Nous pouvons voir que nos régressions ont un petit écart de l'ordre de 0.1%, ce qui est négligeable.

Lorsque l'utilisateur va rentrer un  $\Delta\theta$ , des fonctions vont rechercher le facteur correctif associé – s'il existe –. Si l'on voulait calculer un échauffement à plus de 120 °C sur la température du conducteur qui est donné pour un échauffement de 105 °C, ce serait impossible puisque notre facteur de correction s'arrête à 105 °C, comme on peut le voir sur la Figure 43 Tableau de facteur de correction pour une température d'âme de 105 °C avec régression.

Maintenant que nous avons nos facteurs correctifs, nous les multiplions par le courant donné dans la Figure 38 Capacité de transport de courant des conducteurs en cuivre ; conducteur unique en plein air - température ambiante 30 °C partie 2.

Si l'on trace nos résultats, nous obtenons ce graphique:

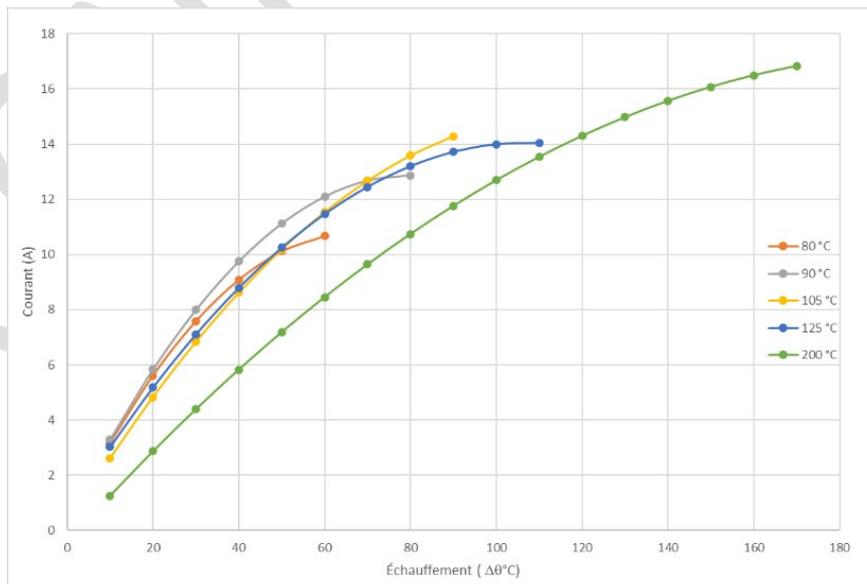


Figure 44 Tableau de valeurs MIL STD339

Nous pouvons voir que nos courbes sont très proches les unes des autres sauf la courbe représentant une température d'âme de 200 °C. Nous allons donc l'exclure de nos données car les valeurs sont aberrantes.

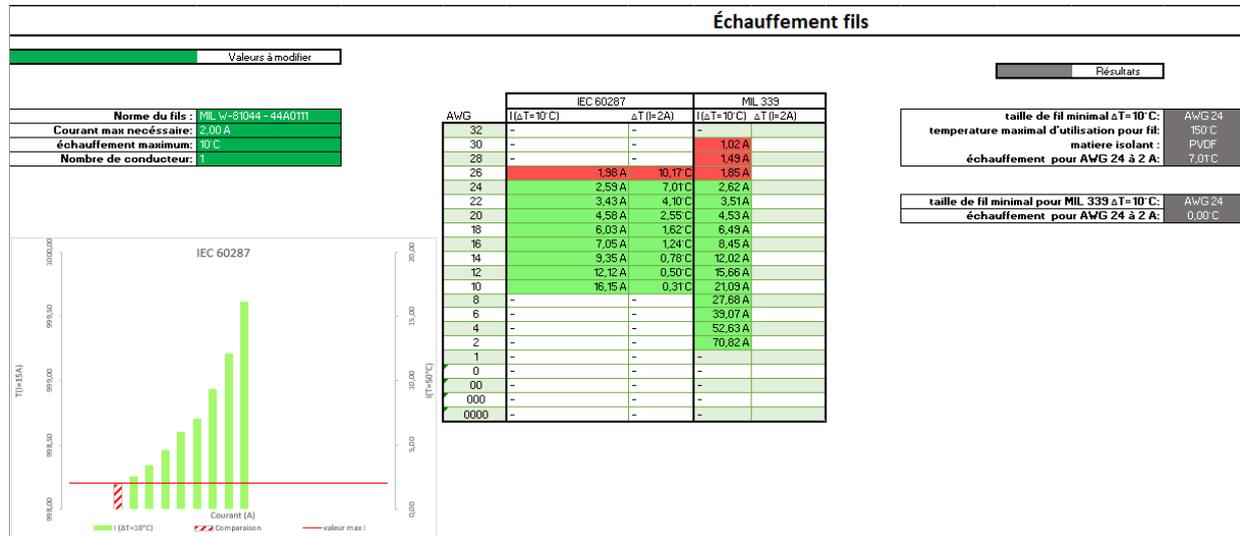


Figure 45 Feuille de calculs IEC 60287 et MIL STD 339 sans régression

### 4.6 Régression sur MIL STD 339

On va faire la même action que pour l'IEC 60287 en extrapolant les données afin d'obtenir un échauffement pour un courant donné.

On trace alors un nuage de points, et on récupère la fonction utilisée précédemment pour trouver le facteur correctif correspondant. Puis, on multiplie nos facteurs par le courant donné dans le tableau Figure 37 Capacité de transport de courant des conducteurs en cuivre ; conducteur unique en plein air - température ambiante 30 °C partie 1.

échauffement	AWG24					moyenne
	80 °C	90 °C	105 °C	125 °C	200 °C	
0						0,000
10	3,0398	3,0728	2,2512	2,7711	1,1789	2,463
20	5,3879	5,4498	4,1621	4,7418	2,6945	4,487
30	7,2829	7,4600	5,8863	6,4982	4,1303	6,252
40	8,7246	9,1034	7,4236	8,0405	5,4862	7,756
50	9,7131	10,3799	8,7742	9,3686	6,7621	9,000
60	10,2485	11,2895	9,9380	10,4825	7,9583	9,983
70	10,4160	11,8323	10,9150	11,3823	9,0745	10,724
80	0,0000	12,0083	11,7053	12,0678	10,1108	11,473
90	0,0000	0,0000	12,3087	12,5392	11,0673	11,972
100	0,0000	0,0000	0,0000	12,7965	11,9439	12,370
110	0,0000	0,0000	0,0000	12,8395	12,7406	12,790
120	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	13,4574	13,457
130	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	14,0944	14,094
140	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	14,6515	14,651
150	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	15,1287	15,129
160	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	15,5260	15,526
170	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	15,8434	15,843
180	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	16,0810	16,081
190	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	16,2386	16,239

Figure 46 Nuage de points MIL-STD 339 d'un échauffement de 0 °C à 190 °C pour AWG 24

On trace dans un graphique les différentes colonnes de ce tableau pour observer les données. On rajoute les courants indiqués dans le tableau pour des échauffements de températures de 50 °C, 60 °C, 75 °C, 105 °C, 170 °C. On obtient une base pour l'analyse de nos valeurs extrapolées.

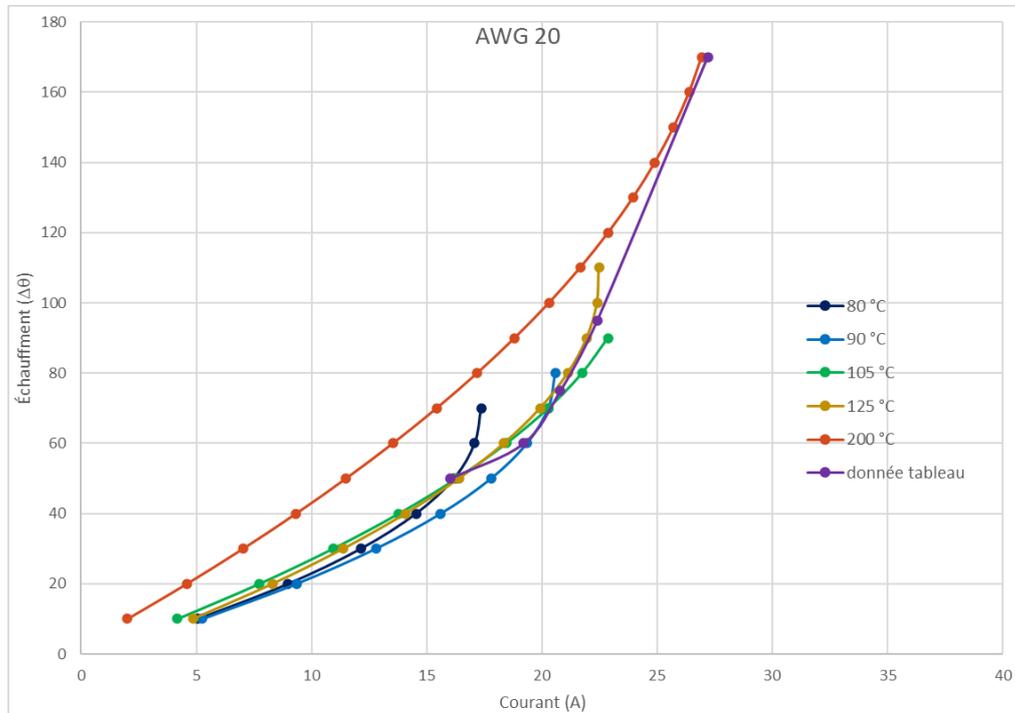


Figure 47 Graphique des différentes colonnes des nuages de points de la MIL STD 339

Nous nous apercevons que les données de la colonne 200 °C sont des valeurs aberrantes, sauf lorsque l'échauffement est de l'ordre de 170 °C car il correspond quasiment aux valeurs données par le tableau.

Lorsque l'on fait la moyenne, nous excluons donc la courbe 200 °C, sauf le dernier point à 170 °C de cette courbe car il va nous permettre d'avoir une allure cohérente sur des deltas de température élevée.

On va regarder qu'elle régression serait la plus cohérente à faire sur notre modèle.

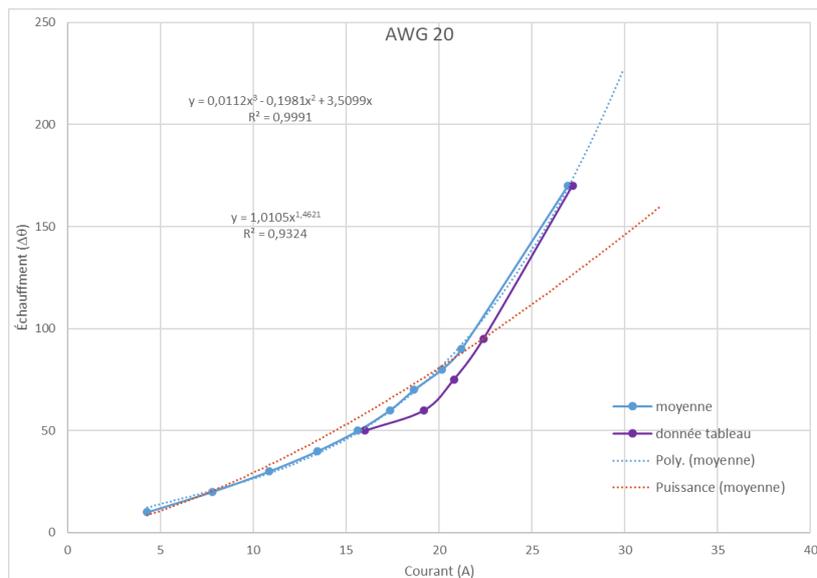


Figure 48 Étude des régressions polynomiales d'ordre deux et régression puissance

On peut voir que la régression qui possède le plus grand coefficient de détermination est le polynomiale d'ordre 3. Nous utiliserons par la suite, une régression polynomiale d'ordre 3 sur toutes nos tailles de fils. On crée un tableau regroupant tous les termes, puis on calcule l'échauffement pour un courant donné avec les coefficients.

linéariser AWG	a x^3+b x^2+ c x+d				échauffement à 2 A
	a	b	c	d	
30	0,54323353	-0,85907228	10,8319455	0	22,57347007
28	0,201935862	-1,0141149	9,50246278	0	16,56395287
26	0,152942422	-1,01322015	8,01149523	0	13,19364923
24	0,038798817	-0,20586309	4,42098767	0	8,328913525
22	0,024623594	-0,30253581	4,19118393	0	7,369213377
20	0,01000794	-0,14285347	3,0116334	0	5,531916449
18	0,003631504	-0,07352376	2,09875185	0	3,932460686
16	0,001372058	-0,03228377	1,51986301	0	2,921567408
14	0,000650852	-0,03186874	1,38641483	0	2,650561524
12	0,00045437	-0,03132729	1,26812321	0	2,414572229
10	0,000180502	-0,01736218	0,96907836	0	1,870152028
8	6,49595E-05	-0,00736166	0,62824795	0	1,227568937
6	3,13217E-05	-0,00530963	0,51322443	0	1,005460931
4	1,45501E-05	-0,00351192	0,42507465	0	0,836218028
2	6,28626E-06	-0,00203893	0,32191644	0	0,635727457

Figure 49 Tableau calcul des coefficients de régression

### 4.7 Facteur de correction pour des groupes de câbles

La norme donne un tableau de facteurs à appliquer pour les groupes de câbles.

No. of conductors in bundles	Multiplying factor
1	1.6
2 - 3	1.0
4 - 5	0.8
6 - 15	0.7
16 - 30	0.5

Figure 50 Facteur de correction pour groupement de câbles

On doit ajouter une étape intermédiaire afin de pouvoir afficher le résultat pour l'utilisateur.

Nous devons multiplier les valeurs calculées par le bon facteur de correction en fonction du nombre de câbles demandés par l'utilisateur.

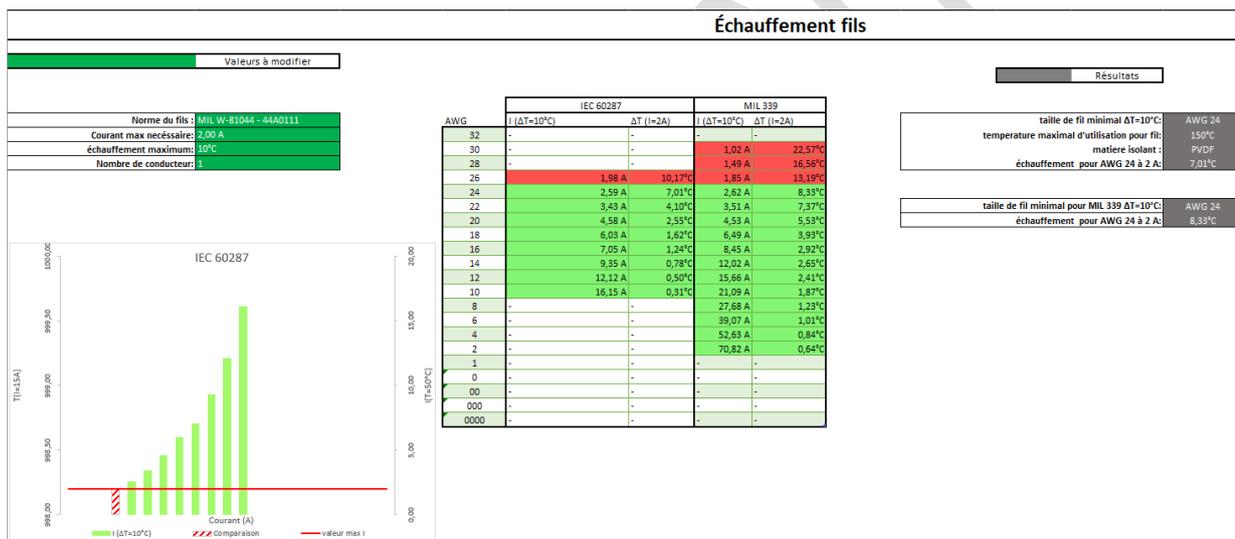


Figure 51 Feuille de calcul avec IEC 60287 et MIL STD 339

On peut voir que nos deux normes sont cohérentes entre elles, puisque pour un échauffement de 10 °C sur la taille de fils AWG 24, la norme IEC 60287 nous donne 2.59 A, et la norme MIL STD 339 nous donne 2.62 A.

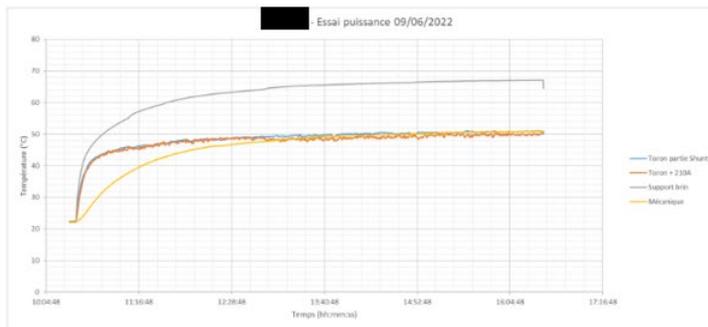
En revanche, pour des grandes tailles de fils, nous voyons que l'écart devient non négligeable. La norme IEC 60287 indique 16.15 A pour une taille de fils de AWG 10, alors que la norme MIL STD 339 indique 21 A, soit plus de 30 % d'écart.

### 4.8 Comparaison avec des données mesurées

Nous allons comparer les données obtenues par notre feuille de calculs avec les données mesurées il y a deux ans sur un collecteur tournant afin de vérifier si les données sont cohérentes.

Des mesures ont été réalisées il y a deux ans sur l'échauffement de dix fils de référence MIL-W 22759/34 AWG 10, dans lesquels circulait un courant de 21 A. L'échauffement mesuré était de 28 °C.

### 3. Essai puissance V1 – 09/06/2022



12

EXXELIA

Figure 52 Essai échauffement fils sur collecteur

Regardons les résultats donnés par la feuille de calculs.

Valeurs à modifier		IEC 60287		MIL 339	
AWG	I (ΔT=28°C)	ΔT (I=21A)	I (ΔT=28°C)	ΔT (I=21A)	
32	-	-	-	-	-
30	-	-	1,09 A	58617,91°C	-
28	1,35 A	2285,97°C	1,59 A	20452,09°C	-
26	1,85 A	1391,40°C	1,98 A	14964,30°C	-
24	2,43 A	892,71°C	2,80 A	4028,74°C	-
22	3,24 A	565,08°C	3,75 A	2227,31°C	-
20	4,41 A	344,46°C	4,85 A	922,22°C	-
18	6,00 A	210,17°C	6,94 A	332,96°C	-
16	7,11 A	160,13°C	9,03 A	150,31°C	-
14	9,68 A	97,47°C	12,83 A	65,10°C	-
12	12,77 A	62,43°C	16,74 A	38,94°C	-
10	17,50 A	37,61°C	22,53 A	26,48°C	-
8	27,40 A	18,24°C	29,56 A	20,38°C	-
6	37,52 A	10,96°C	41,72 A	15,87°C	-
4	52,44 A	6,35°C	56,20 A	13,92°C	-
2	72,90 A	3,69°C	75,67 A	11,45°C	-
1	85,04 A	2,86°C	-	-	-
0	99,58 A	2,21°C	-	-	-
00	117,49 A	1,67°C	-	-	-
000	136,63 A	1,30°C	-	-	-
0000	160,07 A	1,00°C	-	-	-

Figure 53 Calcul échauffement du fil pour 21 A

La norme IEC 60287 donne 37 °C d'échauffement pour 21 A, Si on avait voulu avoir un échauffement de 28 °C, il aurait fallu faire passer un courant de 17.5 A, soit un écart de 17 %. La norme IEC 60287 est donc peu précise pour des groupes de câbles, puisque les groupes de câbles

ne correspondent pas à notre situation. Elle est plus précise sur un seul câble puisqu'elle prend en compte les différentes épaisseurs d'isolant et de blindage.

La norme MIL STD 339 donne 26,48 °C d'échauffement pour 21 A, ce qui est très proche de la valeur calculée (6 % d'erreur). La norme MIL STD 339 est plus générale car elle dispose d'un tableau prenant uniquement en compte le diamètre du fil. Elle néglige totalement la composition du câble.

Pour un grand nombre de câbles, il est préférable d'utiliser la norme MIL STD 339 mais pour peu de câbles, il est préférable d'utiliser la norme IEC 60287.

Nous vérifions avec les valeurs discrètes des normes que l'on obtient bien la même chose qu'avec la feuille de calculs. Cela permet de valider la feuille de calculs pour quelle puisse être utilisée par les équipes du bureau d'études.

CONFIDENTIEL

## V. Conclusion

Le projet de ce Mémoire est de proposer la création d'un synoptique des règles de conception des collecteurs tournants chez Exxelia. En étudiant les pratiques existantes, nous avons pu élaborer un logigramme qui met en œuvre, améliore, standardise et harmonise les processus et les règles de conception des collecteurs tournants.

L'élaboration d'une feuille de calculs pour la sélection des diamètres de fils, en fonction du courant et de l'échauffement limite, est un exemple pratique de l'amélioration proposée dans cette étude. La comparaison entre les normes IEC et MIL souligne l'importance de sélectionner la norme adéquate en fonction du nombre de câbles pour une conception plus précise de nos produits.

En suivant ce logigramme, les concepteurs pourraient aborder la réalisation de nouveaux produits avec une méthodologie claire et standardisée, et ainsi gagner du temps et limiter les erreurs. Cette méthodologie permettrait par ailleurs d'assurer une meilleure cohérence entre les différents projets de l'entreprise.

En termes de perspectives, il conviendrait de faire évoluer ce logigramme en le complétant avec les règles manquantes, en développant les règles peu précises, en l'adaptant à l'évolution des produits. Pour cela, il serait primordial de maintenir un dialogue avec les différents acteurs d'un projet, afin de rester pertinent et efficace.

Ce projet constitue donc une base solide pour une méthodologie de conception uniformisée chez Exxelia.

## VI. Synthèse de formation

Ces trois années de formation ont été instructives et m'ont aidé à développer mon sens de l'analyse. Le mode de l'alternance m'a permis d'appliquer mes connaissances théoriques dans le monde du travail.

### 1. Parcours académique

La première année académique m'a permis de m'accoutumer au fonctionnement d'une école d'ingénieurs : emploi du temps différent chaque semaine, organisation des notes par bloc de matières qui peuvent se compenser individuellement...

Les cours donnés lors de la première année d'ingénieur sont des rappels de concepts déjà étudiés – au premier semestre – et une formation en mathématique et en physique – au deuxième semestre – qui nous a servi de base pour la suite de la formation.

La deuxième année de formation a été décisive. Nous avons été initiés à beaucoup de matières difficiles à appréhender, telles que la mécanique des fluides, le calcul des structures par la méthode des éléments finis, la vibration des structures et la mécanique des milieux continus poussés. En parallèle de ces fondamentaux, nous avons reçu des enseignements généraux dans de nouveaux domaines, tels que la métrologie, les polymères, les statistiques. L'année fut donc très dense. Nous avons pu nous centrer sur l'apprentissage de ce qui constitue le cœur de métier d'un ingénieur mécanique, tout en abordant un enseignement de qualité dans des matières connexes.

La dernière année nous a permis de mettre en application tout ce que nous avons appris durant les deux premières années, avec plusieurs projets à réaliser en groupe. Chacun a pu apporter sa contribution. L'émulation du groupe et la synergie des connaissances et du savoir-faire nous ont fortement motivés à mener ces projets à bien.

Les cours théoriques et les cas pratiques m'ont permis d'acquérir une polyvalence et m'ont fait prendre conscience de l'intérêt de prendre du recul pour pouvoir appréhender les problématiques tant professionnelles que relationnelles.

### 2. Parcours professionnel

Pour ma première année en tant qu'apprenti ingénieur mécanique chez Exxelia, l'objectif était en fin d'année d'être à même de réaliser le travail d'un dessinateur projeteur.

J'ai commencé par m'approprier les différents outils et par comprendre la méthodologie de travail spécifique à Exxelia. On m'a donné des projets très différents les uns des autres pour appréhender les différents aspects du métier de dessinateur projeteur.

A la fin de la première année, j'étais à même de réaliser en autonomie le travail d'un dessinateur projeteur. J'ai pu épauler un ingénieur conception dans la réalisation d'un nouveau collecteur tournant, en l'aidant sur la conception et la mise en plan des composants d'un nouveau produit.

La deuxième année en entreprise était axée sur l'initiation aux travaux d'un ingénieur où il m'a été demandé de faire des projets plus complexes qui nécessitaient une recherche plus approfondie. Cette deuxième année en entreprise a demandé une recherche importante sur les différents projets abordés. J'ai pu bénéficier d'un accompagnement de qualité sur la résolution de certaine problématique.

La dernière année a été davantage axée sur la R&D et l'amélioration continue avec une analyse poussée des méthodologies de conception et la création de plusieurs règles de conception. J'étais davantage en autonomie et j'ai pu être à l'initiative de ma propre méthodologie de travail.

### 3. Compétences acquises

Ces trois années m'ont apporté beaucoup en connaissances et en compétences.

Les séquences académiques m'ont permis d'acquérir un bagage technique et scientifique utile et de développer une rigueur sur les travaux rendus. J'ai pu apprendre les fondamentaux dans des domaines totalement différents, tels que la mécanique, l'acoustique, la gestion de brevets. J'ai aussi pu développer une compréhension pluridisciplinaire des projets et un sens critique sur les solutions techniques apportées par les autres corps de métier.

Quant à la partie entreprise, elle m'a permis d'avoir des compétences de terrain ; comment aller chercher l'information nécessaire, comment s'organiser en entreprise et travailler en groupe. J'ai aussi pu voir ce qu'était vraiment le métier d'ingénieur conception. Je suis capable d'effectuer des recherches et de les synthétiser en une méthodologie simple de compréhension et d'utilisation.

### 4. Difficultés rencontrées

Pendant ces trois années de formation, j'ai rencontré plusieurs difficultés. La plus grande a été de gérer la quantité d'informations à absorber en deuxième année. Certaines matières demandaient une rigueur particulière en mathématique, avec des méthodologies spécifiques à maîtriser. En parallèle, nous avions aussi des cours dans des domaines nouveaux, moins complexes mais tout aussi exigeants. Cela représentait beaucoup de choses à mémoriser. Pour faire face à cette charge de travail, il a fallu être organisé et savoir refaire les exercices en décomposant la méthodologie.

Une des plus grosses difficultés que j'ai rencontré en entreprise a été de comprendre la feuille de calculs de l'échauffement des fils, notamment lorsqu'il a fallu exprimer l'échauffement grâce au courant. Pour cela, j'ai dû résoudre un polynôme de degré 5. Je me suis documenté sur la résolution de polynômes et je n'arrivais pas à trouver de solution concrète à ce problème. J'ai essayé d'utiliser des logiciels de calculs, mais les résultats n'étaient pas corrects. J'ai finalement utilisé une régression puissance qui m'a permis d'approcher la solution concrète.

## VII. Conclusion générale

Ce Mémoire a permis d'aborder de manière approfondie la création d'un synoptique des règles de conception des collecteurs tournants, en réponse à un besoin crucial de standardisation chez Exxelia. En identifiant les lacunes existantes et en développant des règles de conception claires et structurées, ce projet a démontré l'importance de la normalisation pour améliorer la qualité et la fiabilité des produits.

L'impact de ce travail va au-delà de la simple optimisation des processus internes. Il pose les bases d'une méthodologie de conception rigoureuse qui peut être adaptée sur d'autres produits, ouvrant la voie à une meilleure harmonisation des pratiques. De plus, ce travail servira de trame pour la rédaction d'un manuel de conception, fournissant ainsi un guide complet pour les futures équipes.

En outre, ce projet s'inscrit dans une démarche plus large d'amélioration continue. Les résultats obtenus ne constituent pas une fin en soi, mais plutôt une étape dans un processus évolutif qui nécessite une veille technologique permanente et une adaptation à l'évolution continue de nos produits.

Enfin, cette réflexion ouvre la voie pour l'avenir. Les technologies évoluent, et il est essentiel que les règles de conception continuent d'être mises à jour pour rester pertinentes. Des collaborations entre les équipes de conception et de production, ainsi qu'une ouverture vers des innovations technologiques comme l'intégration d'algorithmes, voire d'intelligence artificielle. Les processus de conception permettent l'amélioration de ces travaux et restent essentiels à l'évolution des produits d'Exxelia.

## VIII. Glossaire

<b>Brique technologique :</b>	Chacune des caractéristiques et fonctions d'un collecteur tournant, essentielle pour son bon fonctionnement.
<b>Collecteur tournant :</b>	Dispositif électromécanique permettant la transmission de signaux électriques ou de puissance entre une partie fixe et une partie rotative.
<b>Fiber Optical Rotary Joint :</b>	Joint rotatif spécialisé permettant la transmission d'un signal optique entre une partie fixe et une partie mobile.
<b>Codeur optique :</b>	Capteur qui convertit un déplacement mécanique (rotation) en signal numérique pour la mesure de la position ou de la vitesse.
<b>Joint rotatif hydraulique :</b>	Type de joint rotatif permettant la circulation de fluides (hydrauliques) entre une partie fixe et une partie mobile.
<b>Norme IEC 60287 :</b>	Norme internationale relative au calcul du courant admissible dans les câbles électriques.
<b>MIL-STD-339 :</b>	Norme militaire pour la sélection et l'installation des dispositifs de câblage dans les véhicules de combat et tactiques.
<b>Moyeu : pistes</b>	Partie centrale d'un collecteur tournant pour l'assemblage des avec les isolants nécessaires pour les connexions électriques.
<b>Brins :</b>	Filaments ou conducteurs individuels qui transportent les signaux électriques ou la puissance à travers un collecteur tournant. Ils glissent sur les pistes pour maintenir une connexion stable pendant la rotation.
<b>Piste :</b>	Surface conductrice sur laquelle les brins glissent, permettant la continuité électrique lors de la rotation.
<b>Règle de conception :</b>	Ensemble de directives ou de principes à suivre lors de la conception d'un composant ou d'un système, assurant sa fonctionnalité, sa sécurité, et sa conformité aux normes établies.

## IX. Bibliographie

- CAE industry. « Fiche technique KZ 04 KZ 05 KZ 06 », 2016.
- Dorsey, Glenn, et Michael O'Brien. « Fiber Optic Rotary Joints (FORJ) - Performance and Application Highlights », s. d.
- Dos Santos, W.N., C.Y. Iguchi, et R. Gregorio. « Thermal Properties of Poly(Vinilidene Fluoride) in the Temperature Range from 25 to 210 °C ». *Polymer Testing* 27, n° 2 (avril 2008): 204-8. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2007.10.005>.
- Exxelia group. « Electromechanical solutions », 2016. <https://exxelia.com/uploads/PDF/59ad33d6e8bc2.pdf>.
- Galois, Evarsite. « Mémoire sur les conditions de résolubilité des équations par radicaux », 1830.
- « IEC 60287-1-1 calcul du courant admissible - partie 1-1: Equation de l'intensité du courant admissible (facteur de charge 100%) et calcul des pertes - généralités », 2001.
- « IEC 60287-2-1 calcul du courant admissible - partie 2: Résistance thermique -Section 1: Calcul de la résistance thermique », 1994.
- « IEC 60287-2-2 calcul du courant admissible - partie 2: Résistance thermique -Section 2: Méthode de calcul des coefficients de réduction de l'intensité de courant admissible pour des groupes de câbles posés à l'air libre et protégé du rayonnement solaire direct », 1995.
- « MIL-STD-339: military standard: wiring & wiring devices for combat and tactical vehicles, selection and installation », 1998.
- Reychem. « SPECIFICATION CONTROL DRAWING 44A0111 », 2011.
- . « SPECIFICATION CONTROL DRAWING 55A0111 », 2011.
- . « SPECIFICATION CONTROL DRAWING 55A0811 », 2017.

## X. Table des figures et tableaux

Figure 1 Schéma d'un collecteur tournant avec support brins .....	6
Figure 2 FORJ mono voie à lentille à gradient d'indice .....	7
Figure 3 Un codeur optique absolu <sup>2</sup> .....	8
Figure 4 Joint rotatif hydraulique .....	8
Figure 5 Base de données collecteur fichier interne .....	9
Figure 6 Type de brins mono à gauche et multi à droite .....	11
Figure 8 Support brins classique .....	11
Figure 7 Support brins épingle .....	11
Figure 9 Support brins puissance .....	12
Figure 10 Piste sans oreille.....	13
Figure 11 Piste avec oreille .....	13
Figure 12 Piste avec déport .....	13
Figure 13 Angle de piqûre d'un moyeu .....	13
Figure 14 Vue en coupe d'un collecteur tournant à charbons.....	14
Figure 15 moyeu Usiné puis Empiler.....	14
Figure 16 Moyeu Empilé puis Usiné.....	14
Figure 17 Tableau de dépendance brique technologique et cahier des charges.....	16
Figure 18 Données du cahier des charges pour chacun des choix de briques.....	17
Figure 19 Organigramme de Julien Dessalles.....	18
Figure 20 Organigramme général regroupant les quatre organigrammes.....	19
Figure 21 partie de l'organigramme avec compatibilité.....	20
Figure 22 Légende organigramme avec compatibilité.....	21
Figure 23 Logigramme de conception - vue générale.....	22
Figure 24 Zoom sur le logigramme partie puissance .....	23
Figure 25 Liste des briques technologiques avec présence ou non de règle de conception.....	24
Figure 26 Norme 44A0111 Reychem (norme MIL-W-81044).....	27
Figure 27 Tableau 1 - IEC 60287-1-1 $\alpha 20$ .....	28
Figure 28 Tableau 2 - Valeur des constante Z, E, g pour des câbles à l'air libre .....	32
Figure 29 Premières version de la feuille de calcul .....	35
Figure 30 Données pour le calcul des coefficients de réduction pour des groupes de câbles.....	36
Figure 31 Tableau de connectivité entre les dispositions et les groupes.....	37
Figure 32 Cas sélection "fonction du fil" .....	37
Figure 33 Cas sélection "3 câbles trèfle" et "3 trèfles disposés côte à côte".....	38
Figure 34 Nuage de point Courant en fonction de l'échauffement.....	40
Figure 35 Tableau de calculs MIL W-81044 avec calcul échauffement pour 2 A .....	41
Figure 36 Feuille de calcul avec calcul par IEC 60287 et calcul par régression de la norme.....	41
Figure 37 Capacité de transport de courant des conducteurs en cuivre ; conducteur unique en plein air - température ambiante 30 °C partie 1 .....	42

Figure 38 Capacité de transport de courant des conducteurs en cuivre ; conducteur unique en plein air - température ambiante 30 °C partie 2 .....42

Figure 39 Facteur de correction pour des températures ambiantes supérieures à 30 °C.....43

Figure 40 Tableau de facteur de correction pour une température d'âme de 200 °C avec régression .....43

Figure 41 Tableau de facteur de correction pour une température d'âme de 105 °C avec régression .....43

Figure 42 Tableau de facteur de correction pour une température d'âme de 200 °C avec régression .....44

Figure 43 Tableau de facteur de correction pour une température d'âme de 105 °C avec régression .....44

Figure 44 Tableau de valeurs MIL STD339 .....44

Figure 45 Feuille de calculs IEC 60287 et MIL STD 339 sans régression.....45

Figure 46 Nuage de points MIL-STD 339 d'un échauffement de 0 °C à 190 °C pour AWG 2445

Figure 47 Graphique des différentes colonnes des nuages de points de la MIL STD 339 .....46

Figure 48 Étude des régressions polynomiales d'ordre deux et régression puissance .....47

Figure 49 Tableau calcul des coefficients de régression.....47

Figure 50 Facteur de correction pour groupement de câbles .....48

Figure 51 Feuille de calcul avec IEC 60287 et MIL STD 339 .....48

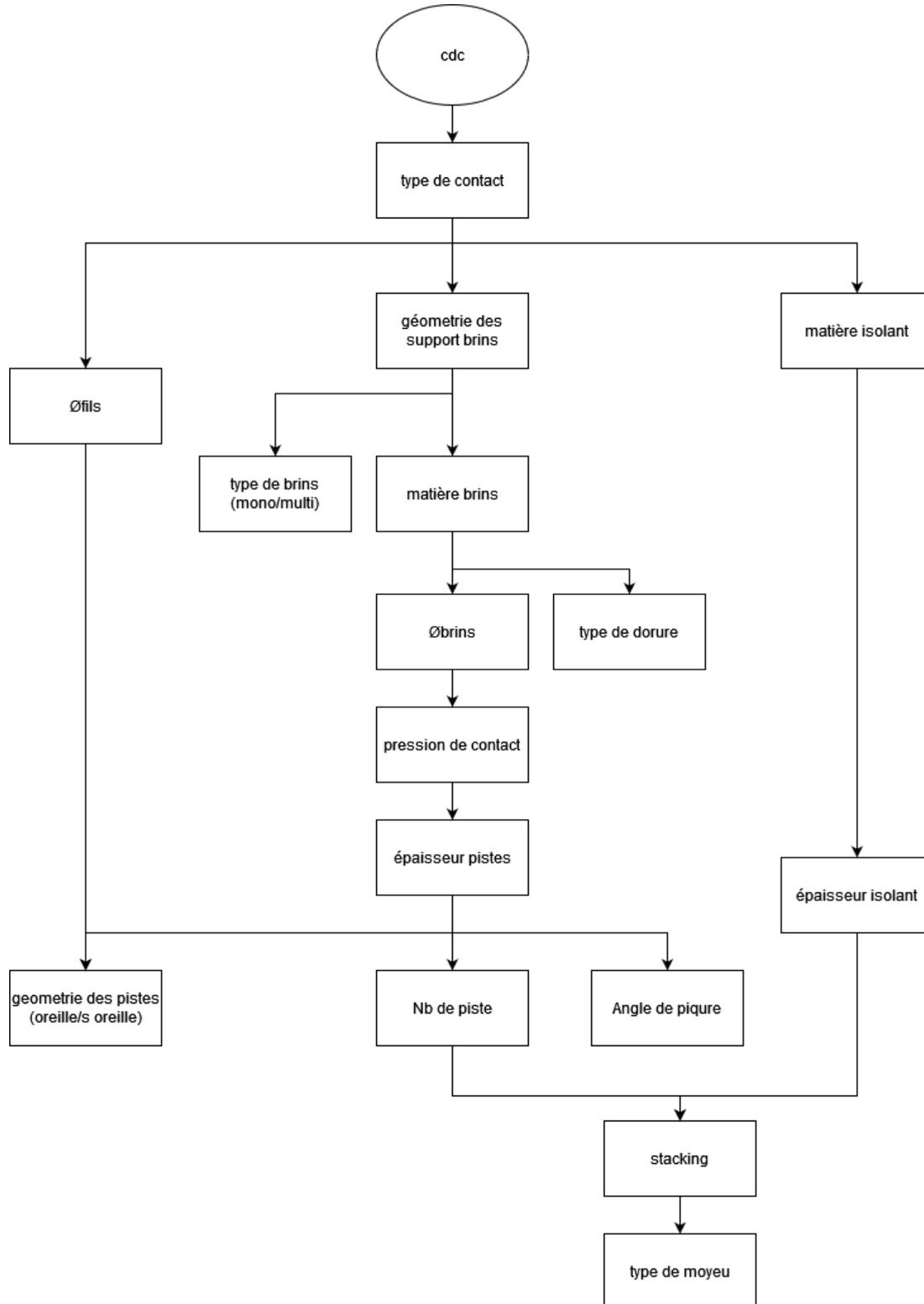
Figure 52 Essai échauffement fils sur collecteur .....49

Figure 53 Calcul échauffement du fil pour 21 A .....49

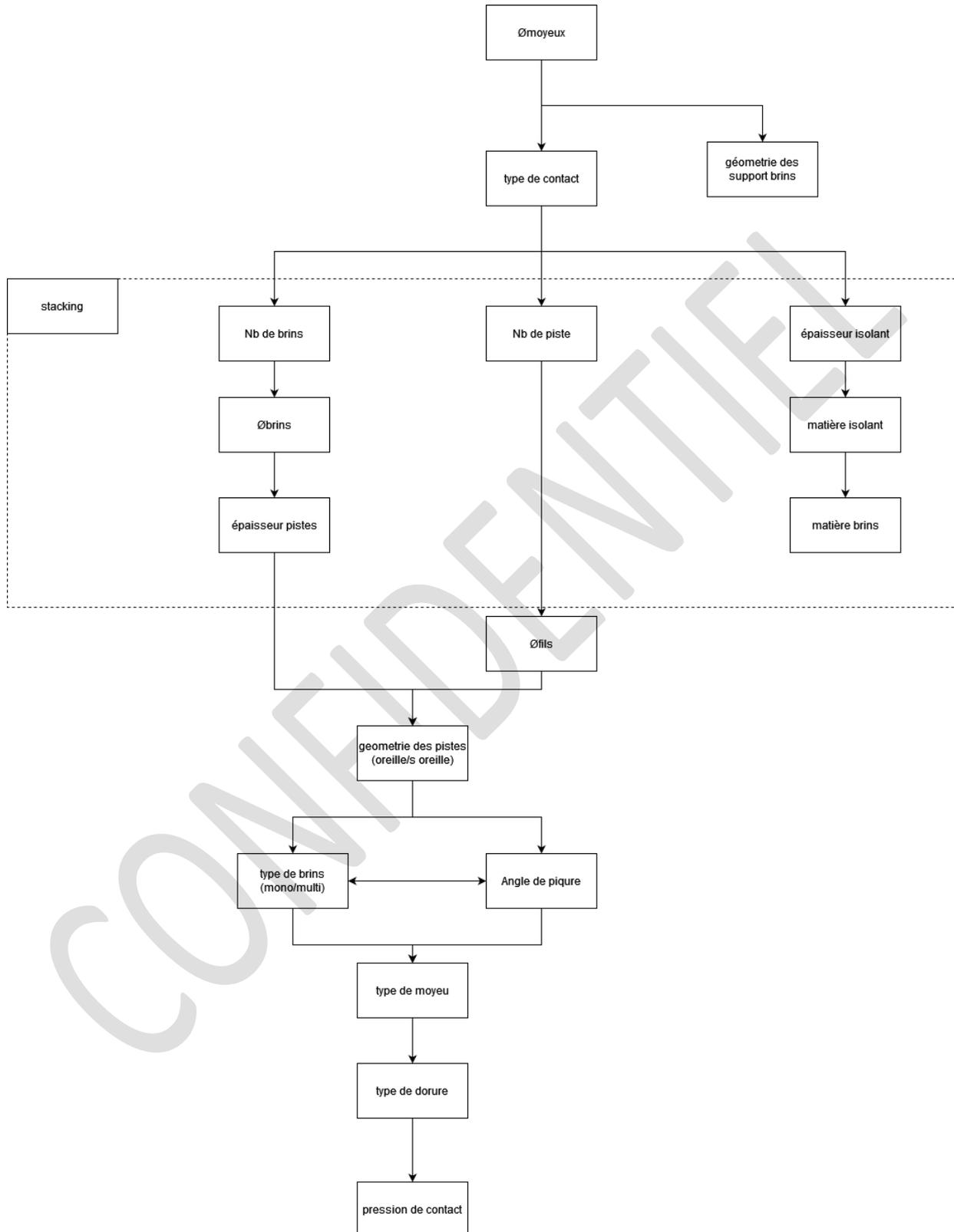
CONFIDENTIEL

XI. Annexe

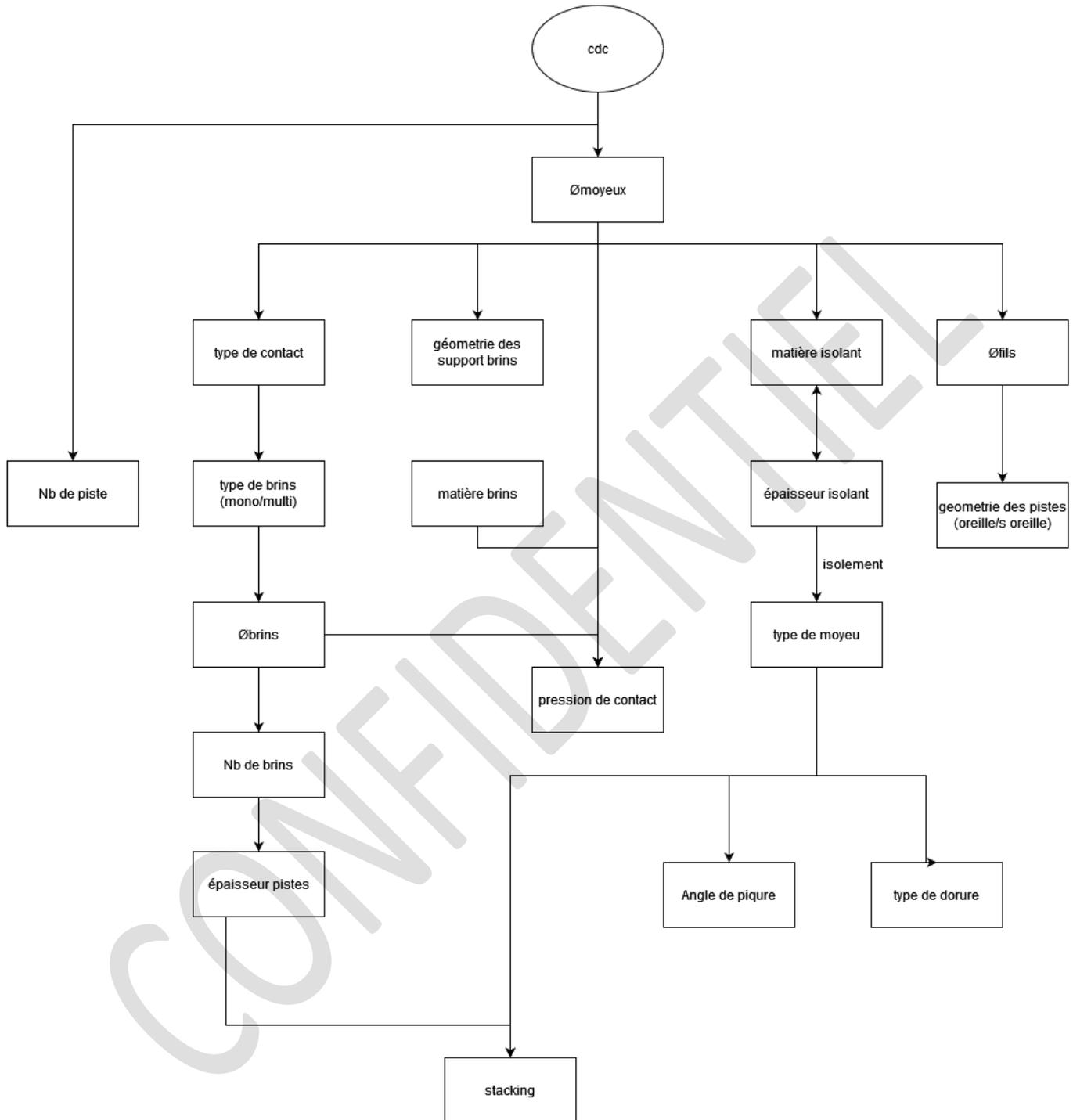
Annexe A : Organigramme dépendance Franck Limousin



**Annexe B : Organigramme dépendance Arnaud Chagnon**



**Annexe C : Organigramme Gaëlle Pettinelli**



**Annexe D : Guide d'utilisation d'une feuille de calculs**

Pour utiliser la feuille de calculs, il faut rentrer les paramètres du cahier des charges dans les cellules vertes : type de fils, courant maximum par fils, échauffement maximum autorisé et le nombre de conducteur entourée en rouge ci-dessous.

Valeurs à modifier		IEC	
Norme du fil :	MIL-W 22759/34 - 55A0811	AWG	I (ΔT=10°C)
Courant max nécessaire:	15,00 A	32	-
échauffement maximum:	10°C	30	-
Nombre de conducteur:	2	28	-
		26	-
		24	-
		22	-
		20	-
		18	-
		16	-
		14	-
		12	-

La feuille donne, pour un delta de température fixé et pour chaque taille de fils, le courant admissible, avec la norme IEC 60287 entouré en bleu, et avec la norme MIL STD 339 entourée en orange. Les cellules en rouge correspondent aux valeurs inférieures au courant devant être transmis par le câble (valeurs saisies par l'utilisateur). Les cellules en vert correspondent aux tailles de fils pour lesquelles le courant admissible est supérieur à la limite imposée par l'utilisateur.

Résultats

AWG	IEC 60287		MIL 339	
	I (ΔT=10°C)	ΔT (I=15A)	I (ΔT=10°C)	ΔT (I=15A)
32	-	-	-	-
30	-	-	0,64 A	7274,80°C
28	1,30 A	525,33°C	0,93 A	2435,49°C
26	1,74 A	326,46°C	1,16 A	1722,94°C
24	2,27 A	213,39°C	1,64 A	523,88°C
22	2,98 A	137,06°C	2,20 A	266,72°C
20	3,98 A	85,68°C	2,83 A	128,35°C
18	5,30 A	54,00°C	4,06 A	58,22°C
16	6,22 A	41,74°C	5,28 A	36,85°C
14	8,29 A	26,22°C	7,51 A	23,91°C
12	10,74 A	17,21°C	9,79 A	18,67°C
10	14,43 A	10,64°C	13,18 A	15,75°C
8	21,75 A	5,44°C	17,30 A	11,74°C
6	29,18 A	3,35°C	24,42 A	9,69°C
4	39,86 A	2,00°C	32,89 A	8,38°C
2	54,11 A	1,19°C	44,27 A	6,64°C
1	62,38 A	0,94°C	-	-
0	72,57 A	0,72°C	-	-
00	84,89 A	0,55°C	-	-
000	98,22 A	0,43°C	-	-
0000	114,20 A	0,33°C	-	-

taille de fil minimal ΔT=10°C:	AWG 8
temperature maximal d'utilisation pour fil:	150°C
matiere isolant :	ETFE
échauffement pour AWG 8 à 15 A:	5,44°C

taille de fil minimal pour MIL 339 ΔT=10°C:	AWG 8
échauffement pour AWG 8 à 15 A:	11,74°C

AWG	IEC 60287		MIL 339	
	I ( $\Delta T=10^{\circ}C$ )	$\Delta T$ (I=15A)	I ( $\Delta T=10^{\circ}C$ )	$\Delta T$ (I=15A)
32	-	-	-	-
30	-	-	0,64 A	7274,80°C
28	1,30 A	525,33°C	0,93 A	2435,49°C
26	1,74 A	326,46°C	1,16 A	1722,94°C
24	2,27 A	213,39°C	1,64 A	523,88°C
22	2,98 A	137,06°C	2,20 A	266,72°C
20	3,98 A	85,68°C	2,83 A	128,35°C
18	5,30 A	54,00°C	4,06 A	58,22°C
16	6,22 A	41,74°C	5,28 A	36,85°C
14	8,29 A	26,22°C	7,51 A	23,91°C
12	10,74 A	17,21°C	9,79 A	18,67°C
10	14,43 A	10,64°C	13,18 A	15,75°C
8	21,75 A	5,44°C	17,30 A	11,74°C
6	29,18 A	3,35°C	24,42 A	9,69°C
4	39,86 A	2,00°C	32,89 A	8,38°C
2	54,11 A	1,19°C	44,27 A	6,64°C
1	62,38 A	0,94°C	-	-
0	72,57 A	0,72°C	-	-
00	84,89 A	0,55°C	-	-
000	98,22 A	0,43°C	-	-
0000	114,20 A	0,33°C	-	-

Résultats

taille de fil minimal $\Delta T=10^{\circ}C$ :	AWG 8
temperature maximal d'utilisation pour fil:	150°C
matiere isolant :	ETFE
échauffement pour AWG 8 à 15 A:	5,44°C

taille de fil minimal pour MIL 339 $\Delta T=10^{\circ}C$ :	AWG 8
échauffement pour AWG 8 à 15 A:	11,74°C

CONFIDENTIEL

La deuxième colonne donne l'échauffement maximal pour un courant donné par l'utilisateur. Les valeurs sont entourées en bleu pour la norme IEC 60287, et en orange pour la norme MIL STD 339.

AWG	IEC 60287		MIL 339	
	I ( $\Delta T=10^{\circ}C$ )	$\Delta T$ (I=15A)	( $\Delta T=10^{\circ}C$ )	$\Delta T$ (I=15A)
32				
30			0,64 A	7274,80°
28	1,30 A	525,33°C	0,93 A	2435,49°C
26	1,74 A	326,46°C	1,16 A	1722,94°C
24	2,27 A	213,39°C	1,64 A	523,88°C
22	2,98 A	137,06°C	2,20 A	266,72°C
20	3,98 A	85,68°C	2,83 A	128,35°C
18	5,30 A	54,00°C	4,06 A	58,22°C
16	6,22 A	41,74°C	5,28 A	36,85°C
14	8,29 A	26,22°C	7,51 A	23,91°C
12	10,74 A	17,21°C	9,79 A	18,67°C
10	14,43 A	10,64°C	13,18 A	15,75°C
8	21,75 A	5,44°C	17,30 A	11,74°C
6	29,18 A	3,35°C	24,42 A	9,69°C
4	39,86 A	2,00°C	32,89 A	8,38°C
2	54,11 A	1,19°C	44,27 A	6,64°C
1	62,38 A	0,94°C		
0	72,57 A	0,72°C		
00	84,89 A	0,55°C		
000	98,22 A	0,41°C		
0000	114,20 A	0,33°C		

Résultats

taille de fil minimal pour IEC 60287  $\Delta T=10^{\circ}C$ : AWG 8  
 matière isolant : ETFE  
 échauffement pour AWG 8 à 15 A: 5,44°C

taille de fil minimal pour MIL 339  $\Delta T=10^{\circ}C$ : AWG 8  
 échauffement pour AWG 8 à 15 A: 11,74°C

Les cellules entourées en vert synthétisent le tableau de gauche et donnent explicitement la taille minimum de fils, en respectant les critères de courant pour un échauffement donné. Ce tableau indique la matière d'isolant de la référence de fils pour la norme IEC. Une dernière cellule indique l'échauffement maximum pour le courant, en fonction du courant admissible.

Ci-dessous se trouvent les tableaux de la norme IEC 60287 qui définissent les installations et dispositions de câbles. Deux cellules (entourées en rouge) permettent de définir manuellement ces installations et ces dispositions de câbles, au lieu d'avoir une sélection automatique par la feuille de calculs.

Tableau 1					Tableau 2			
N°	Installation	Z	E	g	Disposition des câbles	Effet thermique de proximité négligeable si $eD_0$ est plus grand ou égal à:	Effet thermique de proximité non négligeable	
							Si $eD_0$ est inférieur à:	Valeurs moyennes de $h_1/h_2$ (1) (2)
					1	2	3	4
1	Un seul câble <sup>1)</sup>	0,21	3,04	0,60				
2	Deux câbles joints horizontaux	0,29	2,35	0,60				
3	Trois câbles posés en triangle	0,36	1,25	0,20				
4	Trois câbles joints horizontaux	0,62	1,95	0,25				
5	Deux câbles joints, verticaux	1,42	0,86	0,25				
6	Deux câbles espacés de $D_0$ , verticaux	0,75	2,80	0,30				
7	Trois câbles joints, verticaux	1,61	0,42	0,20				
8	Trois câbles espacés de $D_0$ , verticaux	1,31	2,00	0,30				
<sup>1)</sup> Les valeurs données pour un seul câble, s'appliquent aussi à trois les câbles d'un groupe immergé/séparé horizontalement par un intervalle d'au moins 0,75 fois le diamètre extérieur du câble.					Câble à côté 2 multipolaires 3 multipolaires 2 triphasés 3 triphasés L'un au-dessus de l'autre 2 multipolaires 3 multipolaires 2 triphasés Prés d'une surface verticale ou d'une surface horizontale sous le câble	0,5	0,5	1,41
						0,75	0,75	1,65
						1,0	1,0	1,2
						1,5	1,5	1,25
						2	2 ou 0,5	1,085 ( $eD_0$ ) <sup>-0,129</sup> ou 1,305
						4	4 ou 0,5	1,19 ( $eD_0$ ) <sup>-0,155</sup> ou 1,57
						4	4 ou 0,5	1,106 ( $eD_0$ ) <sup>-0,074</sup> ou 1,59
						0,5	0,5	1,23

selection manuel disposition câble  
 fonction de fils  
 fonction de fils