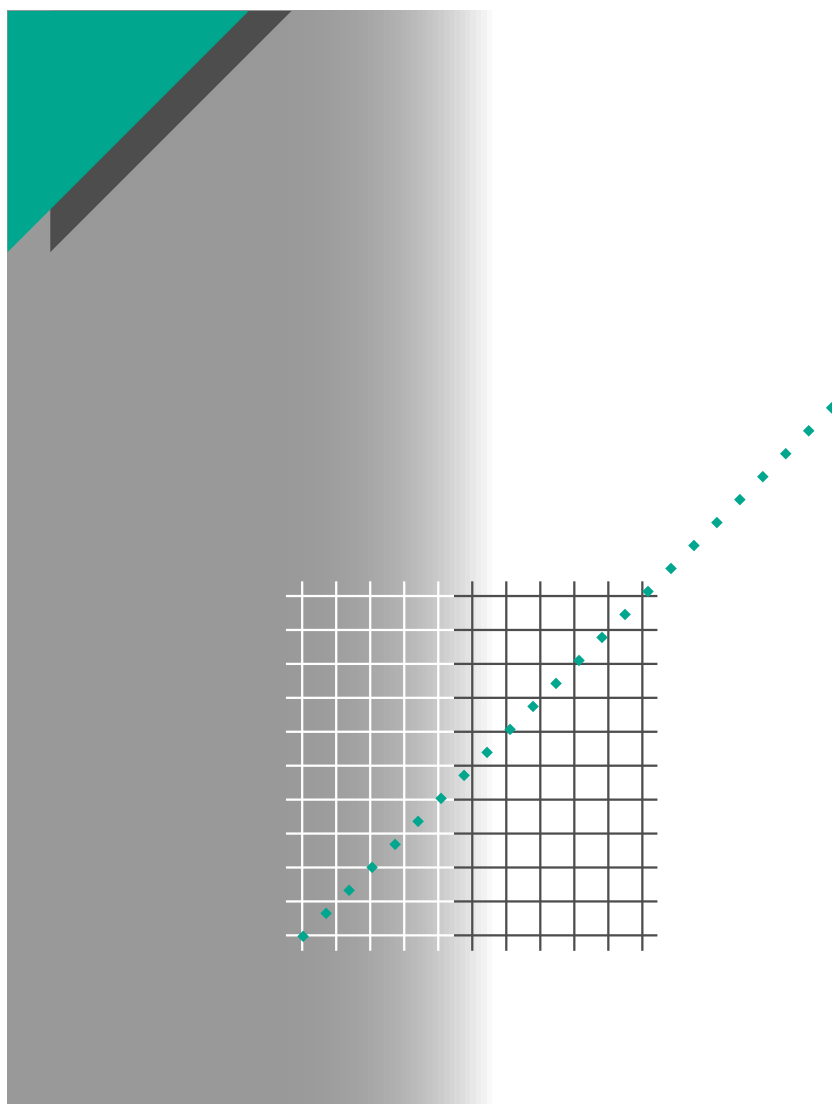


Cahier technique n° 145

Etude thermique des tableaux électriques BT



C. Kilindjian



GROUPE SCHNEIDER

Les Cahiers Techniques constituent une collection d'une centaine de titres édités à l'intention des ingénieurs et techniciens qui recherchent une information plus approfondie, complémentaire à celle des guides, catalogues et notices techniques.

Les Cahiers Techniques apportent des connaissances sur les nouvelles techniques et technologies électrotechniques et électroniques. Ils permettent également de mieux comprendre les phénomènes rencontrés dans les installations, les systèmes et les équipements.

Chaque Cahier Technique traite en profondeur un thème précis dans les domaines des réseaux électriques, protections, contrôle-commande et des automatismes industriels.

Les derniers ouvrages parus peuvent être téléchargés sur Internet à partir du site Schneider.

Code : <http://www.schneider-electric.com>

Rubrique : **maîtrise de l'électricité**

Pour obtenir un Cahier Technique ou la liste des titres disponibles contactez votre agent Schneider.

La collection des Cahiers Techniques s'insère dans la « Collection Technique » du groupe Schneider.

Avertissement

L'auteur dégage toute responsabilité consécutive à l'utilisation incorrecte des informations et schémas reproduits dans le présent ouvrage, et ne saurait être tenu responsable ni d'éventuelles erreurs ou omissions, ni de conséquences liées à la mise en œuvre des informations et schémas contenus dans cet ouvrage.

La reproduction de tout ou partie d'un Cahier Technique est autorisée après accord de la Direction Scientifique et Technique, avec la mention obligatoire : « Extrait du Cahier Technique Schneider n° (à préciser) ».

n° 145

Etude thermique des tableaux électriques BT

C. KILINDJIAN



Ingénieur diplômé en 1986 de l'Ecole Supérieure d'Energie et Matériaux d'Orléans, à rejoint Merlin Gerin en 1986, au sein du service technique de l'Unité Tableau Basse Tension.

En tant que responsable des études de base, il s'est occupé en particulier des problèmes de transferts thermiques et de tenue électrodynamique des équipements basse tension.

Après avoir suivi le développement technique des auxiliaires thermiques pour les enveloppes BT en général, il intervient aujourd'hui comme expert thermique dans les projets de développement de la Division Basse Tension de Puissance de Schneider.

Lexique

BT : Basse Tension

CEI : Commission Electrotechnique Internationale

Coefficient de déclassement : Pour un appareil donné, rapport entre le courant thermique conventionnel sous enveloppe (I_{the}) et son courant assigné d'emploi (I_e ou I_n). Sa valeur dépend du mode d'installation et d'utilisation de l'appareil et de son environnement.

Coefficient de diversité ou de foisonnement : Rapport entre le courant assigné du disjoncteur d'arrivée et la somme des courants assignés des départs. Ce coefficient est aussi appelé facteur de diversité.

Courant assigné d'emploi (I_e ou I_n) : Pour un appareil donné, il est défini par le constructeur et tient compte de la tension assignée d'emploi, de la fréquence assignée, du service assigné, ...

Courant thermique conventionnel à l'air libre (I_{th}) : C'est la valeur maximale du courant d'essai à utiliser pour les essais d'échauffement d'un matériel sans enveloppe à l'air libre. Sa valeur doit être au moins égale à la valeur maximale du courant assigné d'emploi du matériel sans enveloppe, en service pendant 8h.

Courant thermique conventionnel sous enveloppe (I_{the}) : C'est la valeur du courant fixée par le constructeur, à utiliser pour les essais d'échauffement du matériel lorsqu'il est monté dans une enveloppe spécifique. Si le matériel est normalement destiné à être utilisé dans des enveloppes non spécifiques, cet essai n'est pas obligatoire lorsque l'essai au courant thermique conventionnel à l'air libre (I_{th}) a été effectué. Dans ce cas, le constructeur doit être en mesure de fournir des indications sur la valeur du courant thermique sous enveloppe ou sur le facteur de déclassement.

Degré Celsius, °C (anciennement centigrade) : Température relative au point de référence 0°C qui est la température de la glace fondante, et à 100°C qui est celle de l'eau bouillante à la pression atmosphérique normale.

Degré Fahrenheit, °F : Unité utilisée plus particulièrement dans les pays de langue anglaise. Les points de référence sont : 32°F pour la température de la glace fondante et 212°F celle de l'eau bouillante à pression atmosphérique normale.
Pour obtenir l'expression de la température Fahrenheit à partir du degré Celsius, il faut multiplier la température en °C par 9, puis diviser par 5, et ajouter 32.

Degré Kelvin, °K : Unité du système international (SI). Echelle absolue car sa définition repose sur des bases physiques précises. Même graduation que l'échelle Celsius, mais avec une origine décalée de 273 degrés : La glace fondante correspond à 273°K.

Ensemble d'appareillage à BT : Combinaison d'un ou de plusieurs appareils de connexion à basse tension avec les matériels associés de commande, de mesure, de signalisation, de protection, de régulation, etc..., complètement assemblés sous la responsabilité du constructeur, avec toutes leurs liaisons internes mécaniques et électriques et leurs éléments de construction.

Enveloppe BT : Terme générique désignant les coffrets, les armoires et les tableaux basse tension. Ce terme désigne également la structure permettant d'assurer la protection des composants et appareillages BT contre certaines influences externes et la protection contre les contacts directs.

ES /EDS : Ensemble de série et ensemble dérivé de série, équipements BT définis par les normes, imposant différentes caractéristiques techniques, règles de conception et d'essais.

Jeux de barres (de l'ensemble) : Terme générique désignant l'ensemble des conducteurs rigides distribuant le courant électrique à l'intérieur d'une enveloppe BT à l'exception des conducteurs placés en aval des divers appareils de protection et/ou de commande.

Système : Au sens thermique du terme, c'est la région de l'espace que l'on considère et dont on étudie les évolutions. Il est limité par des frontières réelles ou fictives qui selon le type d'échange se produisant à leur niveau nous permettent de distinguer les systèmes isolés (aucun échange d'énergie ni de matière à travers sa frontière), les systèmes fermés (échange uniquement d'énergie à travers sa frontière, par exemple : enveloppe BT étanche) et les systèmes ouverts (échange de matière et d'énergie éventuellement à travers sa frontière, par exemple : enveloppe BT ventilée).

TGBT : Tableau Général Basse Tension

Thermique : Partie de la physique qui traite de la production, de la transmission et de l'utilisation de la chaleur. Ici, c'est l'aspect transmission qui sera considéré, en présentant succinctement les lois de transferts (conduction, convection, rayonnement) et des notions sur les méthodes pour les évaluer.

Etude thermique des tableaux électriques BT

L'objectif de ce Cahier Technique est d'apporter une contribution à la compréhension et à la maîtrise des problèmes thermiques que l'on rencontre au niveau d'un tableau électrique BT.

Après un rappel sur les normes et les phénomènes thermiques : conduction - rayonnement - convection, l'auteur montre comment à partir des techniques de modélisation généralement réservées à d'autres domaines, on peut modéliser les armoires BT.

La modélisation débouche naturellement sur des logiciels d'aide à la conception d'armoires électriques équipées en appareillage.

Les résultats obtenus sont confrontés aux mesures réelles de température. Enfin, la méthodologie et les possibilités du guide CEI 890 sont évoquées.

Sommaire

1 Introduction	1.1 Maîtrise thermique des armoires électriques BT	p. 4
2 Les problèmes thermiques dans une enveloppe	2.1 Causes - effets - solutions	p. 5
	2.2 Point sur les normes	p. 6
3 Comportement thermique d'un tableau électrique BT	3.1 Rappel sur les principaux phénomènes thermiques	p. 8
	3.2 Echanges au niveau d'un tableau	p. 10
4 Présentation de la modélisation	4.1 Principe	p. 11
	4.2 Modélisation de la convection	p. 12
	4.3 Application aux enveloppes BT	p. 13
5 Comportement des sources de chaleur	5.1 Les jeux de barres	p. 14
	5.2 L'appareillage	p. 14
6 Méthode de calcul de la température dans les enveloppes	6.1 Principe	p. 17
	6.2 Description des données à fournir et des résultats obtenus	p. 17
	6.3 Configurations modélisées	p. 18
	6.4 Résultats	p. 18
	6.5 Résultats expérimentaux	p. 21
7 Méthode proposée par le rapport CEI 890		p. 22
8 Conclusion		p. 24

1 Introduction

1.1 Maîtrise thermique des armoires électriques BT

Les nouvelles méthodes de fabrication développées dans l'industrie depuis quelques années (flux tendus...) ont mis en évidence une nouvelle notion : **la sûreté industrielle**. Ce concept, qui englobe deux aspects différents : la sécurité des personnes et des biens et la disponibilité de l'énergie électrique, montre lorsqu'on l'applique à des processus complexes, les points critiques dont le fonctionnement doit être parfaitement maîtrisé.

Le tableau électrique est l'un de ces points critiques.

Il faut noter que le problème est similaire en ce qui concerne le grand tertiaire. Naguère considéré comme un simple point de passage, il est devenu le véritable centre nerveux des installations électriques. De sa sûreté dépend la sûreté de l'ensemble de l'installation et donc de toute activité industrielle ou tertiaire.

La maîtrise de son fonctionnement nécessite de connaître et de contrôler non seulement le fonctionnement de ses constituants mais aussi les influences externes auxquelles ils sont soumis.

Un tableau électrique correspond à l'association de 4 éléments fondamentaux :

- l'enveloppe,
- l'appareillage,
- les conducteurs électriques,
- les fonctions qui assurent la signalisation, la commande, le traitement de l'information.

Le tableau électrique est **de plus en plus technique**. Il nécessite un certain nombre d'**études de base** afin de maîtriser, à la conception, les conditions de fonctionnement de ses constituants dans un environnement donné. Ces études concernent entre autres **les aspects thermiques** qui font l'objet du présent cahier technique.

2 Les problèmes thermiques dans un tableau

La maîtrise thermique est de plus en plus importante pour trois raisons principales :

- tendance à mettre le matériel électrique sous enveloppes (sécurité) qui sont de plus en plus réalisées en matériaux isolants (peu efficaces pour dissiper les calories),
- évolution de l'appareillage qui intègre de plus en plus d'électronique et dont les dimensions sont de plus en plus réduites,
- tendance à remplir les tableaux au maximum et coefficient de foisonnement qui augmente.

Ceci peut conduire à un problème d'échauffement qui se traduira par des températures en différents points d'un appareil ou d'un équipement BT supérieures à des valeurs limites fixées par des normes ou liées à la tenue de certains composants. Une étude thermique d'une enveloppe BT a pour objectif principal de déterminer le courant admissible par chaque appareil, compatible avec ses caractéristiques compte tenu de son environnement de fonctionnement.

2.1 Causes, effets et solutions

La température d'un matériel électrique est le résultat :

- de l'effet Joule ($P = R I^2$), c'est-à-dire de sa résistance au passage du courant,
- de la température ambiante.

L'appareillage électrique est conçu dans le respect des normes de fabrication qui définissent les températures maximales à ne pas dépasser

pour la sécurité des personnes : température du boîtier et des organes de manœuvre, écart de température maximale pour les bornes. Ceci est vérifié par des essais de certification des produits. Dans un tableau électrique, le matériel étant soumis à des conditions d'emploi très variées, les causes de surtempératures sont multiples. Le tableau (cf. **fig. 1**) présente les principales causes, leurs effets et les remèdes possibles.

Causes	Effets	Protection	Remèdes		
Température externe trop élevée	<ul style="list-style-type: none"> ■ Température interne tableau trop élevée ■ Déclenchement des déclencheurs thermiques ■ Vieillessement de l'électronique ■ Température parois de l'enveloppe trop élevée 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Alarme ■ Mise en route d'une ventilation 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Améliorer la ventilation du local et/ou tableau 	Situations aléatoires possibles avec une conception dans les règles de l'art.	CEI 439
Coefficient de foisonnement élevé. Dépassement des possibilités de l'installation	<ul style="list-style-type: none"> ■ Déclenchement de la protection de tête du tableau ■ Température interne tableau trop élevée ■ Température parois de l'enveloppe trop élevée 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Délestage 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Dimensionnement correct du tableau 		
Court circuit ou surcharge	<ul style="list-style-type: none"> ■ Détérioration des conducteurs ■ Détérioration des supports de barres isolants 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Déclenchement de sécurité 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Dimensionnement correct des conducteurs ■ Bonne tenue électrodynamique des supports à T° élevée 		CEI 634
Mauvais serrage	<ul style="list-style-type: none"> ■ Destruction des conducteurs de l'appareillage 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Déclenchement amont aléatoire 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Vérification des serrages ■ Détection des échauffements 	Problèmes de montage et de maintenance Erreur de conception de l'installation	
Section des conducteurs trop faible	<ul style="list-style-type: none"> ■ Destruction des conducteurs 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Aucune 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Dimensionnement correct des conducteurs 		CEI 898
Erreur sur déclassement de l'appareillage ou mauvais positionnement	<ul style="list-style-type: none"> ■ Fonctionnement anormal (déclenchement) ■ Vieillessement prématuré 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Déclenchement ou signalisation 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Revoir choix constituants et/ou positionnement ■ Ventilation 	Erreur sur choix ou emploi de l'appareillage	CEI 947

Fig. 1 : problèmes thermiques en terme de cause/effet.

Tout le problème consiste à s'assurer, au moment de la conception du tableau, que tous ses composants fonctionneront dans des conditions de température moins contraignantes que celles prévues par leurs normes de construction. Les appareillages de connexion, (disjoncteurs, contacteurs etc...), devront évidemment pouvoir, sans problème, être traversés par le courant prévu.

Outre l'objectif de sécurité pour les personnes et les biens, deux objectifs ne doivent pas être perdus de vue :

- disponibilité de l'énergie électrique, (pas de fonctionnement intempestif ou de non fonctionnement),
- durée de vie des composants.

En définitive, le challenge consiste à prévoir avec un bon degré de certitude l'état de fonctionnement thermique du tableau.

Pour ce faire, trois types de solutions :

- l'expérience du tableautier,
- les essais réels pour les tableaux répétitifs,
- l'utilisation de logiciels avec lesquels il est possible de déterminer, en fonction des caractéristiques de l'enveloppe, le couple intensité/température pour chacune des sources de chaleur, (appareillage - conducteurs) cf § 4, et ceci en fonction de leur position et de la température de l'air qui les entoure.

Il est bien évident qu'un logiciel validé par l'expérience et les essais est très utile car il permet d'étudier comparativement les nombreuses configurations d'installations possibles et donc d'optimiser le tableau à réaliser sur les plans thermiques et ... coût.

2.2 Point sur les normes

De nombreuses normes couvrent le domaine de la Basse Tension, par exemple la NFC 15100 pour la France qui définit les règles à respecter pour toutes installations BT.

Pour les aspects de définition et de conception des appareils et des ensembles BT on se réfère respectivement :

- aux normes appareillage par exemple à la CEI 60947,
- à la norme CEI 60439 pour les armoires (ensembles) BT.

La norme internationale CEI 60439 est divisée en cinq parties :

- CEI 60439.1 (nov.1992) qui rassemble les règles pour les ensembles de série et les ensembles dérivés de série,
- CEI 60439.2 (1987) qui définit les règles pour les canalisations préfabriquées,
- CEI 60439.3 (déc.1990) qui concerne les ensembles d'appareillage BT installés dans des lieux accessibles à des personnes non averties,
- CEI 60439.4 (déc.1990) qui définit les règles pour les ensembles de chantiers,
- CEI 60439.5 (mars 1996) qui concerne les ensembles pour réseaux de distribution, installés à l'extérieur (par exemple, les armoires de trottoir).

La partie qui nous concerne particulièrement pour les tableaux BT est la CEI 60439.1 éditée en 1992. Dans le contexte européen, cette dernière sert de charpente pour la plupart des normes nationales (British Standard, NFC, VDE...). En effet leurs contenus reprennent assez fidèlement le texte de la norme CEI, les différences correspondant plus à des habitudes propres au pays qu'à des remises en cause des points fondamentaux de la norme CEI.

En France c'est le cas de la norme NFC 63.421. L'apport essentiel de cette norme a été de définir de façon précise deux notions allant toutes les deux dans le sens d'une augmentation de la sécurité. Ce sont :

- la notion d'ensembles totalement testés **ES** (ensemble de série) ou partiellement testés **EDS** (ensembles dérivés de série),
- la notion de formes (cf. **fig. 2**).

Sans entrer dans le détail, on peut dire que les **ES** correspondent à des produits parfaitement définis et figés tant au niveau de leurs composants (plans précis de chacun des constituants) que de la fabrication (guide de montage...) et devant satisfaire à des **essais de type** (échauffement, court-circuit, continuité de masse...) définis par la norme.

Les **EDS** correspondent à des ensembles dont la structure de base est un ES auquel une ou plusieurs modifications ont été apportées, modifications devant être validées par calcul ou par un essai spécifique.

Quant à la notion de **formes**, elle correspond à une définition précise des degrés de séparation que l'on peut trouver dans un tableau et qui augmentent la protection des personnes par une non accessibilité aux parties actives (jeu de barres...). On distingue 4 types de formes allant d'une absence totale de séparation (forme 1) à un cloisonnement complet des différents éléments du tableau (forme 4).

Il faut noter que ces cloisonnements ont bien évidemment une incidence très forte sur le comportement thermique de ces ensembles.

La norme CEI définit également l'essai d'échauffement que doit vérifier un ensemble. Elle précise les conditions et les limites d'échauffement (§ 8.2.1 de la norme) que ne doivent pas dépasser les différents constituants de l'ensemble.

- Conditions d'essai
- L'ensemble doit être disposé comme en usage normal.
- Le courant correspondant à la valeur assignée est réparti dans les différents appareils en tenant

compte d'un facteur de diversité (Kd) variable suivant le nombre de circuits principaux.

2 ≤ nombre de circuits princ. ≤ 3 Kd = 0,9

4 ≤ nombre de circuits princ. ≤ 5 Kd = 0,8

6 ≤ nombre de circuits princ. ≤ 9 Kd = 0,7

nombre de circuits princ. ≥ 10 Kd = 0,6

□ La stabilisation thermique est atteinte si la variation de température n'excède pas 1°C/h. Les conducteurs raccordés aux appareils doivent être de sections conformes aux directives de la norme.

□ Les mesures de T° sont effectuées à l'aide de thermocouples.

□ La température ambiante de référence est de 35°C.

Par rapport à la température ambiante, on ne doit pas dépasser les échauffements :

■ 70°K pour les bornes de raccordement des conducteurs extérieurs,

■ 25°K pour les organes manuels de commande en matériau isolant,

■ 30°K ou 40°K pour les surfaces métalliques extérieures accessibles ou non,

■ valeurs spécifiques particulières pour les constituants incorporés ainsi que pour les isolants en contact avec les conducteurs.

A signaler encore en terme de normalisation l'existence d'un guide technique de prédétermination de ces échauffements (CEI 890). Son approche demande à être validée par de nombreux essais car elle n'a pas le statut de norme.

Elle fournit des résultats corrects pour des configurations simples (enveloppe peu compartimentée, sources de chaleur uniformément réparties...). Une présentation de cette méthode est proposée dans le § 7 ainsi qu'une comparaison avec notre approche de concepteurs d'« armoires ».

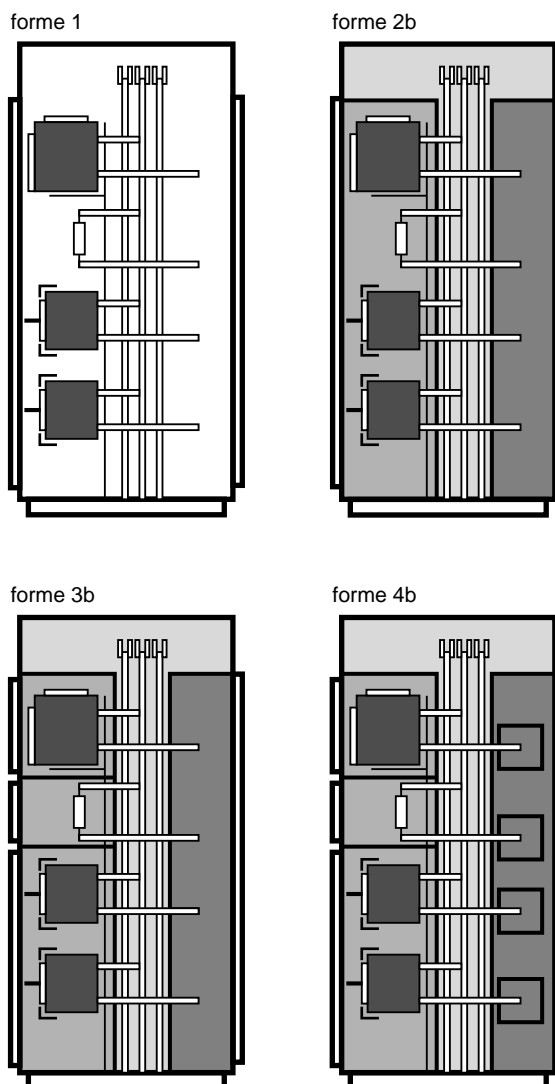


Fig. 2 : différentes « formes » selon norme CEI 60439-1/NFC 63421.

3 Comportement thermique d'un tableau électrique BT

Un tableau électrique est un système constitué d'un fluide, (l'air), et de corps solides dans lesquels le passage de courant électrique s'accompagne de pertes d'énergie qui provoquent une élévation de température.

L'évolution vers l'équilibre thermique se fait par transfert de la chaleur des parties actives (appareils, conducteurs...) où elle est générée, aux parties en contact avec l'extérieur qui la transmettent, à leur tour, au milieu environnant.

3.1 Rappel sur les principaux phénomènes thermiques

Les échanges thermiques permettent de décrire le comportement d'un système quelconque, dont le système tableau électrique. Ils font intervenir trois types de phénomènes différents :

Phénomène de conduction : qui correspond à un transfert de chaleur à l'intérieur de corps solides (cf. **fig. 3**). On distingue :

- d'une part les phénomènes de conduction simple pour lesquels le corps considéré n'est le siège d'aucun phénomène thermique ; par exemple : conduction à l'intérieur d'un mur,
- d'autre part les phénomènes de conduction vive où le corps étudié est le siège d'une création de chaleur ; par exemple : barre en cuivre parcourue par un courant électrique.

Les calculs concernant la transmission de la chaleur par conduction sont basés sur la loi de Fourier qui, pour des géométries simples, se réduit à la relation :

$$\Phi_{ij} = \frac{\lambda S}{d} (T_i - T_j) \text{ avec}$$

Φ_{ij} : flux échangé entre deux points i et j en W,
 λ : conductivité thermique en W/m °C,
S : surface d'échange en m²,
 T_i, T_j : températures des deux points en °C,
d : distance entre les deux points en m,
 λ est caractéristique du milieu « conducteur ». Sa valeur est fonction de la température mais est le plus souvent considérée comme constante.

Ex : quelques valeurs de λ en W/m °C

Argent	$\lambda = 420$
Cuivre	$\lambda = 385$
Aluminium	$\lambda = 203$
Acier	$\lambda = 45$
Matériaux plastiques	$\lambda = 0,2$
Béton	$\lambda = 0,935$
Brique	$\lambda = 0,657$
Laine de verre	$\lambda = 0,055$
Air (30 °C)	$\lambda = 0,026$

Phénomène de rayonnement : correspond au transfert de chaleur entre corps solides séparés par un milieu plus ou moins transparent (cf. **fig. 4**).

Ces échanges, qui s'établissent entre les surfaces de corps quelconques disposés en vis à vis, sont représentés par des relations assez complexes où interviennent :

- l'émission du solide qui, s'il est considéré comme un corps noir, n'est fonction que de sa température,
- les états de surface par l'intermédiaire du coefficient d'émissivité ϵ qui caractérise l'écart des surfaces de ces corps à la référence que représente le corps noir,
- des phénomènes de réflexion et d'absorption,
- la disposition de ces surfaces les unes par rapport aux autres, par l'intermédiaire des facteurs de forme.

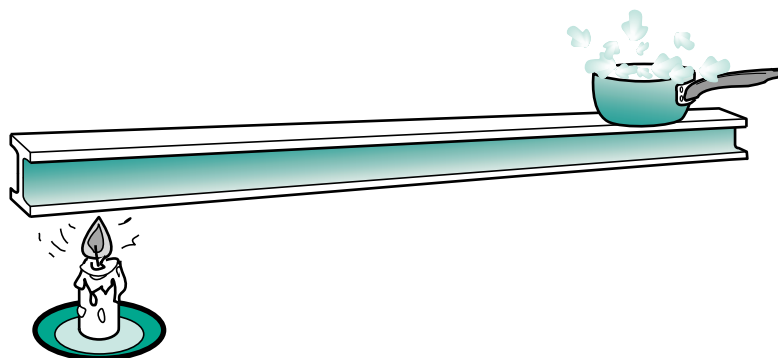


Fig. 3 : phénomènes de conduction.

Cependant dans le cas particulier où une surface (par exemple j) entoure complètement l'autre (i) et tel que le rapport S_j/S_i soit faible, le flux échangé prend la forme suivante :

$$\Phi_i = \varepsilon_i \sigma S_i (T_i^4 - T_j^4) \text{ avec}$$

Φ_i : flux de chaleur transféré à travers la surface S_i en W,

ε_i : coefficient d'émissivité de la surface S_i ,

σ : constante de Stefan-Boltzmann

($5,67032 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$),

S_i : surface en m^2 ,

T_i, T_j : température des surfaces en regard en $^\circ\text{K}$,

Phénomènes de convection : sous le terme général de convection on regroupe en fait deux phénomènes différents mais souvent couplés.

■ **le phénomène de convection proprement dit**

qui correspond à un transfert de chaleur entre un corps solide et un fluide en mouvement. Selon l'origine du mouvement du fluide on distingue la convection naturelle et la convection forcée (cf. **fig. 5**).

Ces transferts sont caractérisés par des coefficients d'échange h_i :

$$\Phi_i = h_i S_i (T_f - T_i) \text{ avec}$$

Φ_i : flux de chaleur échangé à la surface S_i en W,

h_i : coefficient d'échange en $\text{W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$,

T_f, T_i : températures du fluide et de la surface d'échange en $^\circ\text{C}$,

D'un point de vue physique, le problème d'échange de chaleur par convection est fortement lié à un problème de mécanique des fluides.

Cependant d'un point de vue pratique, il peut être abordé « simplement » par l'intermédiaire des coefficients d'échange dont l'expression fait intervenir :

- les paramètres décrivant la nature de l'écoulement du fluide (vitesse ...),
- les propriétés physiques du fluide (conductivité thermique, viscosité dynamique, capacité calorifique, masse volumique ...) associés le plus souvent sous forme de nombres sans dimension ou caractéristiques (nombres de Nusselt, Prandtl, Reynolds, Grasshof ...).

Ex. : expression du coefficient d'échange en convection naturelle pour une géométrie simple : plaque plane verticale de hauteur L et à température uniforme

$$h = \frac{\text{Nu } \lambda}{\text{Dh}} \text{ avec}$$

Nu : nombre de Nusselt,

$$\text{Nu} = 0,53 (\text{Gr Pr})^{0,25}$$

où Gr et Pr sont respectivement les nombres de Grasshof et de Prandtl fonctions des propriétés physiques du fluide et de l'écart de température entre le fluide et la surface d'échange,

λ : conductivité thermique du fluide ($\text{W/m } ^\circ\text{C}$),

Dh : dimension caractéristique (m).

Le plus souvent, elle correspond à la plus grande dimension du corps solide en contact avec le fluide en mouvement, ici L.

Remarque : Il est intéressant de noter que le coefficient d'échange dépend de l'écart de

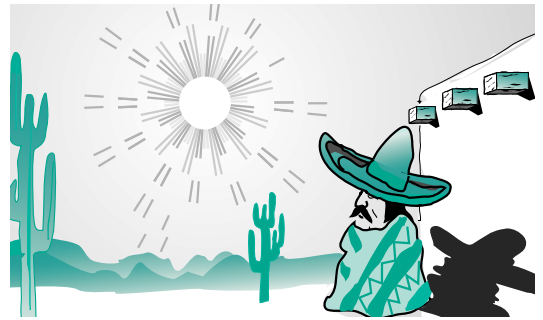


Fig. 4 : phénomènes de rayonnement.

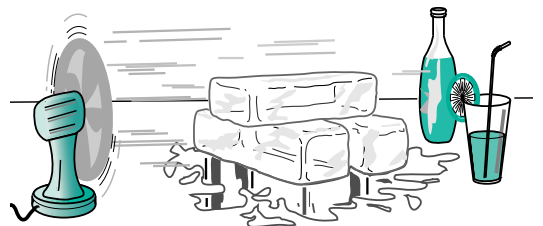


Fig. 5 : phénomènes de convection.

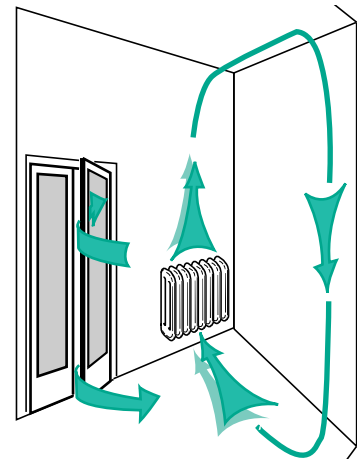


Fig. 6 : phénomènes de mouvements convectifs.

température seulement à la puissance 0,25 donc :

$$h = K(\Delta t)^{0,25}$$

■ **le phénomène de mouvements convectifs**

qui correspond au transfert de chaleur au sein d'un fluide par l'intermédiaire de boucles de convection qui expliquent par exemple le gradient de température observé entre le bas et le haut d'un volume de fluide fermé, siège de phénomènes thermiques.

Les mouvements d'air entre deux volumes i et j sont caractérisés par des débits massiques fonction des sections de passage et de la vitesse de l'écoulement (cf. **fig. 6**).

Le transfert de chaleur est représenté par :

$$\Phi_{ij} = \bar{M} cp (T_i - T_j)$$

avec

Φ_{ij} : flux de chaleur échangé entre i et j en W,
 \bar{M} : débit massique en kg/s,
 cp : capacité calorifique du fluide en J/kg °C,
 T_i, T_j : température du fluide dans les volumes i et j (°C).

Remarque : Le transfert de chaleur est imposé par le sens de l'écoulement.

Expression de la vitesse du fluide : dans le cas de la convection naturelle le fluide est mis en mouvement entre les points i et j, par ses variations de masse volumique avec la température.

La vitesse est donc supposée être proportionnelle à ces variations donc fonction de la différence de température entre i et j.

$$V_{ij} = Cste \sqrt{\frac{\Delta\rho}{\rho} g D_{ij}} \text{ avec}$$

$\Delta\rho/\rho$: variation relative de masse volumique,
 g : accélération de la pesanteur en m/s²,

D_{ij} : distance entre les deux points i,j en m.

De plus si le fluide considéré est supposé avoir un comportement de gaz parfait, alors :

$$\Delta\rho/\rho = \beta (T_i - T_j) \text{ d'où}$$

$$V_{ij} = Cste \sqrt{\beta (T_i - T_j) g D_{ij}}$$

avec $\beta = \frac{1}{(T_i + T_j)/2}$ (cas des gaz parfaits)

T_i, T_j : température du fluide en °K

Ces formules correspondent à des mouvements de volumes de fluide ascendants ou descendants. Dans le cas de mouvement de fluide près d'une paroi, il s'agit d'un problème couplé thermique/hydraulique que l'on peut résoudre dans certains cas de façon analytique (écoulement laminaire le long d'une paroi).

Dans ce cas la vitesse du fluide le long de la paroi a une expression similaire, c'est-à-dire est proportionnelle à un écart de température (fluide-paroi).

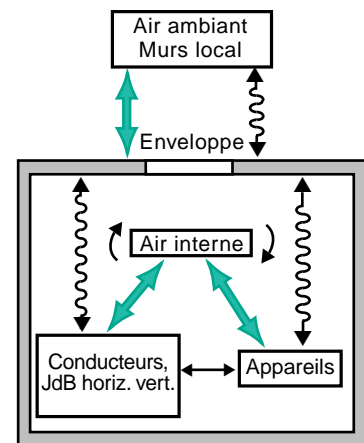
Voir p. 2 pour rappel de la définition °C, °K et °F.

3.2 Echanges au niveau d'un tableau

Dans le schéma suivant (cf. **fig. 7**) sont présentés les éléments constituant le système étudié : air ambiant, enveloppe, air interne, et les différentes sources de chaleur. Cette description de l'état thermique du tableau montre que **tous les phénomènes d'échanges décrits précédemment sont à prendre en compte** et sont fortement couplés.

Par exemple :

- La température de l'air interne résulte :
 - des échanges par convection entre l'air interne et les surfaces des différents appareils, des conducteurs et des parois,
 - de la chaleur transportée par les mouvements convectifs de l'air.
 - Au niveau de l'appareillage la chaleur apparaissant par effet Joule est échangée :
 - par convection entre sa surface d'échange et l'air interne,
 - par conduction avec les barres et les câbles,
 - par rayonnement avec les parois de l'enveloppe et les surfaces des autres appareils.
- Les phénomènes les plus importants intervenant dans le comportement de l'ensemble sont les phénomènes de convection.



Conduction \longleftrightarrow
 Rayonnement \longleftrightarrow
 Convection \longleftrightarrow
 Mouvements convectifs \updownarrow

Fig. 7 : comportement thermique d'une enveloppe.

4 Présentation de la modélisation

4.1 Principe

Toutes les méthodes de résolution sont fondées sur un découpage du système à modéliser en blocs élémentaires que ce soit une méthode de Monte-Carlo, aux différences finies, ou aux éléments finis.

La méthode retenue, l'**analyse nodale**, est issue d'une approche aux différences finies. Cette technique, bien que classique, a l'intérêt de pouvoir représenter le comportement thermique d'un système complexe en prenant en compte les interactions entre les différentes parties ou composants qui le constituent.

Par exemple, elle peut être utilisée dans des domaines très variés pour décrire le comportement d'un satellite artificiel, d'un moteur électrique, les conditions climatiques à l'intérieur d'une station de transformation ou d'un bâtiment de plusieurs pièces.

Sur le principe, cette méthode consiste à décomposer le système étudié en différents **volumes isothermes** appelés **nœuds**. A chaque nœud sont associés différents paramètres, entre autre une température et éventuellement un apport de chaleur indépendant des échanges thermiques. On s'intéresse ensuite aux **couplages entre nœuds**, c'est-à-dire aux différents échanges entre les volumes, ce qui nous permet d'écrire nos équations de bilan (conservation de l'énergie et de matière dans l'élément de volume attaché à un nœud donné). Cette approche qui correspond en fait à une discrétisation spatiale du système, nous conduit à définir un **réseau thermique** avec ses nœuds, ses capacités, ses sources de chaleur, ses conductances, qui traduisent les différents couplages entre nœuds (analogie phénomènes électriques/thermiques) (cf. **fig. 8**).

On aboutit ainsi à un système d'équations couplées, éventuellement, non linéaires, qui vont nous permettre de définir une matrice, la **matrice d'admittance thermique**. Reste alors à préciser les valeurs numériques des éléments de cette matrice qui correspondent aux **conductances thermiques**.

Expression des conductances par type d'échange

- Conduction : $G_{ij} = \lambda_i S_{ij} / D_{ij}$
- Rayonnement : $G_{ij} = \alpha \sigma \varepsilon S F_{ij} (T_i + T_j)(T_i^2 + T_j^2)$
- Convection : $G_{ij} = h_i S_{ij}$
- Mouvement convectif : $G_{ij} = \bar{M} c_p$

Expression du flux thermique équivalant de l'intensité électrique :

$$I = \frac{1}{R} (\Delta U)$$

$$\Phi_{ij} = G_{ij} (T_i - T_j) \text{ avec}$$

Φ_{ij} : flux énergétique échangé entre les nœuds i et j,

G_{ij} : conductance entre i et j, fonction du type d'échange considéré,

T_i, T_j : températures associées respectivement aux nœuds i et j.

Prenons en exemple la modélisation d'une pièce dans laquelle il y a une source de chaleur.

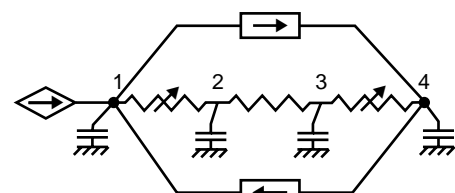
On décompose ce système en 4 nœuds :

- 1 pour l'air interne,
- 2 pour les parois (int. et ext.),
- 1 pour l'air ambiant extérieur.

Représentation nodale (simplifiée) (cf. **fig. 9**).

Grandeurs thermiques	Grandeurs électriques
Température	Potentiel
Résistance thermique	Résistance électrique
Flux de chaleur	Courant
$\Phi = G(T_2 - T_1)$	$I = \frac{1}{R}(U_2 - U_1)$
Capacité thermique	Capacité électrique

Fig. 8 : correspondance grandeurs thermiques/électriques.



- Nœud 1 : air interne
- Nœuds 2 and 3 : parois interne et externe
- Nœud 4 : air ambiant extérieur

- ~ Représente les échanges par conduction
- ~ Représente les échanges par convection
- Représente les échanges par déplacement d'air
- ◇ Représente l'apport de chaleur Q1 dans le nœud 1
- ≡ Représente la capacité calorifique associée à chaque nœud

Fig. 9 : représentation nodale simplifiée - modélisation d'une pièce.

Equations traduisant les flux thermiques pour ce système simple :

nœud 1 :

$$Q_1 - h_{1,2} S_{1,2} (T_1 - T_2) + \bar{M}_{4,1} cp (T_4 - T_1)$$

$$\bar{M}_{1,4} cp (T_1 - T_4) = \rho_1 V_1 cp_1 \bar{T}_1$$

nœud 2 :

$$h_{1,2} S_{1,2} (T_1 - T_2) - \frac{\lambda_2 S_{2,3}}{d_{2,3}} (T_2 - T_3)$$

$$= \rho_2 V_2 cp_2 \bar{T}_2$$

nœud 3 :

$$\frac{\lambda_2 S_{2,3}}{d_{2,3}} (T_2 - T_3) - h_{3,4} S_{3,4} (T_3 - T_4)$$

$$= \rho_3 V_3 cp_3 \bar{T}_3$$

nœud 4 :

$$h_{3,4} S_{3,4} (T_3 - T_4) + \bar{M}_{1,4} cp (T_1 - T_4)$$

$$\bar{M}_{4,1} cp (T_4 - T_1) = \rho_4 V_4 cp_4 \bar{T}_4$$

Remarque : les termes T_i correspondent à $\frac{dT_i}{dt}$.

Ils ne sont donc pas à prendre en compte lorsque l'on s'intéresse seulement au régime établi températures stabilisées.

A partir de ces équations on en déduit le système d'équations $[G] \cdot [T] = [R]$ correspondant bien sûr à :

$$\Phi_{ij} = G_{ij} (T_i - T_j)$$

où :

G : est la matrice d'admittance thermique

T : est le vecteur des températures inconnues

R : est le vecteur des sollicitations imposées (sources de chaleur Q1, température,...).

Ce type d'approche a permis d'élaborer les codes de calcul et les règlements propres aux problèmes thermiques des bâtiments.

4.2 Modélisation de la convection

Comme nous l'avons déjà indiqué au § 3, il y a sous le terme de convection deux phénomènes le plus souvent couplés, (échanges corps fluide et échanges dans le fluide lui-même).

La modélisation des échanges par convection doit donc être divisée en deux parties, une partie

décrivant les débits massiques (mouvement d'air) l'autre les échanges thermiques (coefficient d'échange ...) les deux étant reliées par les dépendances transfert massique/thermique (cf. **fig. 10**).

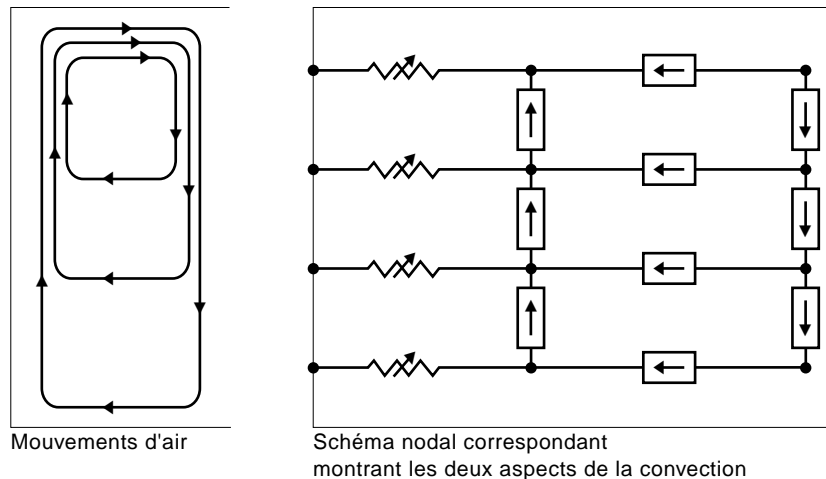


Fig. 10 : modélisation massique et thermique de la convection.

4.3 Application aux enveloppes BT

On distingue pour la modélisation, deux grands types d'enveloppes :

Des enveloppes non cloisonnées

(coffrets, armoires...). Dans ce cas le schéma nodal, celui de la **figure 11**, est assez proche du schéma de la **figure 10**, en intégrant les sources de chaleur.

Des enveloppes fortement cloisonnées avec ou sans ventilation naturelle.

Deux approches sont possibles au niveau de la modélisation :

■ soit chaque zone du tableau est modélisée comme précédemment et l'on associe ensemble ces différents volumes. Mais cela conduit à des matrices beaucoup trop importantes sachant

que l'on peut avoir une dizaine de zones à associer,

■ soit l'on fait une approche plus globale, sans modéliser les boucles de convection à l'intérieur des différents volumes, et en ne tenant compte que des débits d'air entre zones (cf. **fig.12**).

Ces modélisations nous ont conduit à élaborer des logiciels adaptés à chaque type d'enveloppe. Ces programmes sont tous structurés de la même façon.

Avant d'entrer plus en détail dans l'utilisation d'un logiciel (§ 6), il convient de mieux connaître les sources de chaleur (jeu de barres, appareils) pour déterminer le niveau de fonctionnement réel d'un tableau.

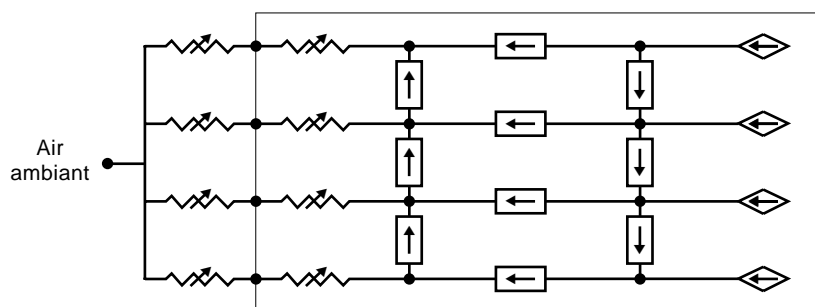


Fig.11 : enveloppes non cloisonnées.

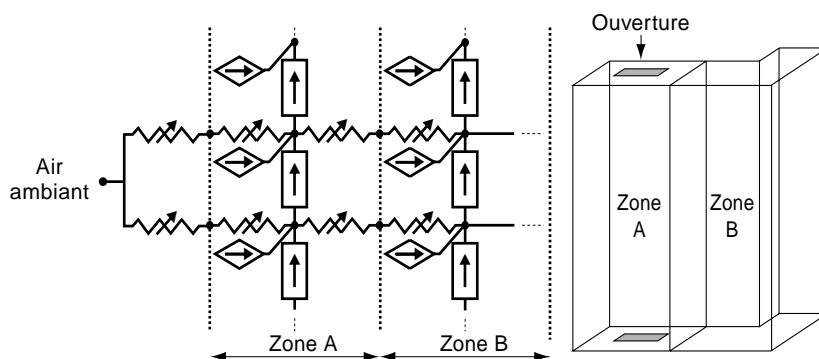


Fig.12 : cas d'une enveloppe cloisonnée.

5 Comportement des sources de chaleurs - Caractéristiques

Les sources de chaleur considérées dans la modélisation sont les jeux de barres, les conducteurs de raccordement et les appareils électriques.
En ce qui concerne ces derniers, ils sont considérés comme des « boîtes noires » dissipant

des calories et non comme des nœuds de la modélisation. C'est-à-dire que l'on ne calcule pas leur température de fonctionnement mais l'intensité maximale qu'ils peuvent véhiculer pour une configuration d'installation donnée, afin qu'ils ne dépassent pas leur température limite d'utilisation.

5.1 Les jeux de barres

Les jeux de barres sont calculés de façon à vérifier deux conditions :

■ Pouvoir véhiculer le courant nominal souhaité sans induire un échauffement des barres entraînant une détérioration des isolants qui maintiennent les barres.

Par exemple les barres peuvent être dimensionnées de façon qu'elles ne dépassent pas, en régime permanent une température de 110°C, cette valeur étant entièrement dépendante de la nature des matériaux isolants en contact avec elles ; par exemple les supports. Le tableau de la **fig. 13** donne pour une température ambiante de 50° et 65°C quelques valeurs de températures de jeux de barres.

■ Pouvoir supporter un courant de court-circuit sans entraîner des déformations de barres notables, une rupture des supports isolants, un échauffement excessif. La deuxième condition correspond à un problème d'efforts

électrodynamiques et peut être étudiée séparément ; par contre la première nécessite de connaître le niveau de fonctionnement de l'ensemble.

En particulier il faut tenir compte de la température de l'air qui entoure les barres pour les dimensionner de façon précise et éviter qu'elles ne dépassent une température critique fonction principalement de la nature du matériau utilisé pour les supports. Ainsi, connaissant la température de l'air dans les différentes zones du tableau, on peut déterminer en fin de programme, la température des barres en fonction de leurs caractéristiques (dimensions, formes, dispositions...) et donc valider leur dimensionnement.

Remarque : En ce qui concerne les calculs de flux thermique, on considère que les barres dissipent principalement la chaleur par convection et rayonnement avec l'air interne.

Temp. à prox. des barres	Section	Intensité (A)	Puissance dissipée (W)	Température des barres (°C)
50	1 b 100x5	1000	45	79
50	1 b 100x5	1500	107	109
50	3 b 100x5	1500	10	65
50	3 b 100x5	3400	61	110
65	1 b 100x5	1000	45	92
65	3 b 100x5	1500	11	80

Fig.13 : valeurs thermiques relatives à quelques jeux de barres, d'une longueur de 1 m, placés dans une ambiance donnée.

5.2 L'appareillage

Dans les armoires de distribution électrique, les disjoncteurs constituent l'essentiel de l'appareillage de puissance. Ceux-ci et les autres constituants que sont les contacteurs et les sectionneurs fusibles, dissipent des

calories lorsqu'ils sont traversés par le courant électrique.

Le tableau de la **figure 14** nous donne, à titre indicatif, quelques valeurs de puissance dissipée par pôle.

Disjoncteurs

Puissance mesurée par wattmètre et non calculée à partir de la mesure de résistance

I_n (A)	250	400	630	800
P_w - fixe (W)	14,1	19	40	41,6
à I_n - décrochable (W)	19,7	30	52	58

Sectionneurs-fusibles

I_n (A)	250	400	630	800
P_w à I_n (W)	30	44	67	—

Contacteurs

I_n (A)	265	400	630	780
P_w à I_n (W)	22	45	48	60

Fig.14 : puissance dissipée, par pôle, à I_n , par l'appareillage classique.

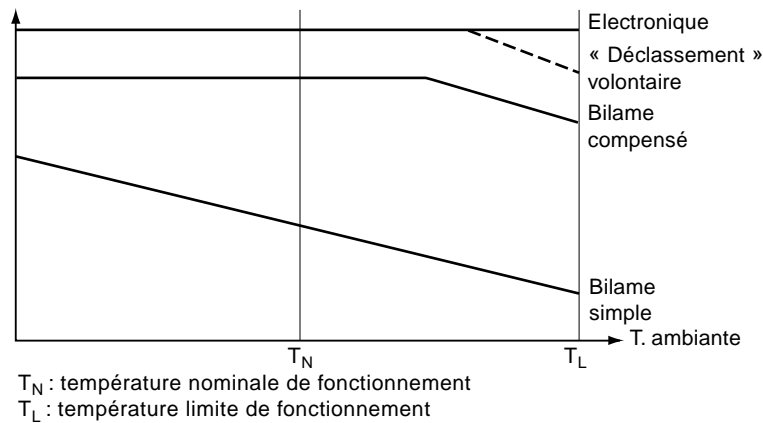


Fig. 15 : courbes de déclassement type des déclencheurs en fonction de la température.

Examinons plus en détail, les disjoncteurs face aux problèmes thermiques :

■ La puissance dissipée est proportionnelle au carré de l'intensité qui les traverse :

$$P_w = P_N \left(\frac{I}{I_n} \right)^2$$

où P_N représente la puissance dissipée au courant nominal d'emploi I_n .

■ Le courant nominal d'emploi (I_n) d'un disjoncteur correspond à une température ambiante donnée, par ex. 40°C, fixée par la norme de construction. En fait, pour certains disjoncteurs, la température ambiante, correspondant à I_n peut atteindre et même dépasser 50°C., ce qui leur donne une sécurité par exemple dans les pays chauds.

■ Le courant de fonctionnement (I_{th} ou I_{the}) peut varier en fonction de la température ambiante, ceci selon le type de « déclencheur » : thermique

simple, thermique compensé, électronique, (cf. fig. 15), ce qui peut permettre de définir un courant maximal d'emploi différent de I_n . Les paramètres qui interviennent dans la détermination du déclassement tiennent compte, en plus de la température de l'air autour de l'appareil (T_i) :

- De la température limite (T_L) des composants internes au disjoncteur :
 - température maxi de fonctionnement du bilame pour un disjoncteur à déclencheur magnéto-thermique,
 - température des composants électroniques pour disjoncteur à déclencheur électronique intégré,
 - température à ne pas dépasser pour les matières plastiques les plus exposées dans un disjoncteur à électronique déportée (relais extérieur/disjoncteur ouvert...).

Ces températures limites sont comprises entre 100 et 150°C.

■ Du rapport entre le I_r du déclencheur et le courant réel de déclenchement quand celui-ci est placé à la température de définition de I_n

$$K_1 = \frac{I_r}{I_n} \text{ (cf. fig. 16).}$$

■ Des sections des câbles ou barres de raccordement qui jouent un rôle de radiateur. Leur influence est prise en compte par un coeff. K_2 .
Remarque : il faut savoir que la section et la longueur des conducteurs utilisés en enveloppe BT sont rarement égales à celles utilisées lors des essais de certification des disjoncteurs.

Le déclassement qui tient compte de ces divers critères peut s'exprimer mathématiquement.

Formule de déclassement :

Le disjoncteur et ses conducteurs de raccordement dissipent essentiellement par convection et rayonnement.

On a donc la relation :

$$W_1 = hS(T_L - T_i) \text{ avec,}$$

W_1 : puissance dissipée en W par un appareil raccordé en enveloppe dans un volume d'air à la température T_i ,

h : coefficient d'échange en $W/m^2 \text{ } ^\circ C$,

S : surface d'échange en m^2 ,

T_L : température du point chaud en $^\circ C$ (par ex. le bilame),

T_i : température de l'air interne autour de l'appareil en $^\circ C$,

$$h = Cste S (T_L - T_i)^\alpha$$

$$\text{d'où } W_1 = Cste S (T_L - T_i)^{1+\alpha}$$

Quand l'appareil est à l'air libre à 40°C on a une relation similaire.

$$W_2 = Cste S (T_L - 40)^{1+\alpha}$$

$$\text{d'où } \frac{W_1}{W_2} = \left(\frac{T_L - T_i}{T_L - 40} \right)^{1+\alpha}$$

De plus on sait que

$$W_1 = RI_{the}^2 \text{ et } W_2 = RI_r^2$$

$$\text{donc } I_{the} = I_r \left(\frac{T_L - T_i}{T_L - 40} \right)^\beta$$

avec I_{the} : intensité traversant l'appareil,

$$I_d = K_1 \times I_n \text{ et } \beta = (1+\alpha)/2$$

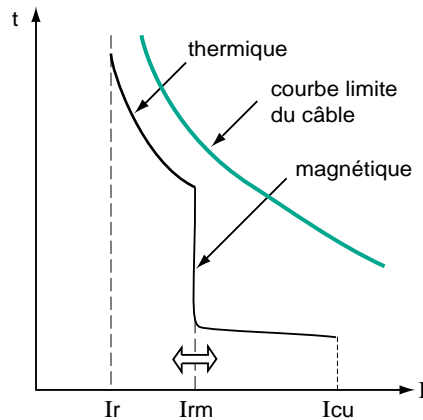
β : coefficient qui caractérise le type d'appareil. Il est déterminé expérimentalement ou par une analyse plus fine du comportement thermique de l'appareil. Sa valeur est comprise entre 0,2 et 0,7.

Relation finale en intégrant en plus l'effet des sections (coeff. K_2)

$$I_{the} = I_n K_1 K_2 \left(\frac{T_L - T_i}{T_L - 40} \right)^\beta$$

■ Les données qui correspondent au comportement du disjoncteur, et qui interviennent dans cette formule, sont utilisées lors du calcul des températures dans l'armoie.

a) disjoncteur magnétothermique



I_r = réglage du thermique
 I_{rm} = réglage du magnétique
 I_{cu} = pouvoir de coupure ultime

b) disjoncteur électronique

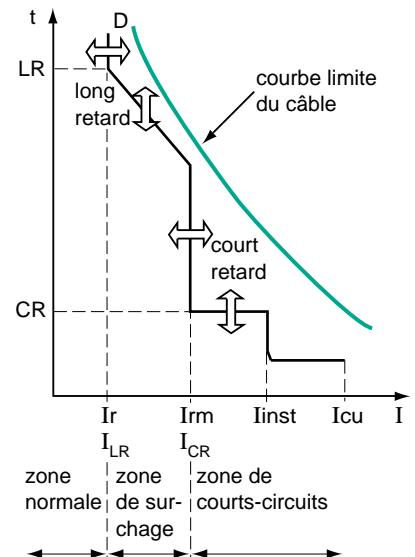


Fig. 16 : courbe de déclenchement d'un disjoncteur.

6 Méthode de calcul de la température dans les enveloppes

La modélisation présentée précédemment a servi de base au développement de notre méthode de calcul laquelle nous permet de déterminer le fonctionnement réel du tableau (intensité max. sur chaque départ...) et donc d'utiliser l'ensemble au mieux avec une sûreté maîtrisée.

Comme c'est souvent le cas en thermique, les nombreuses relations entre paramètres, nécessitent une approche itérative donc l'élaboration d'un logiciel dont nous allons présenter le principe.

6.1 Principe

Le programme procède par deux boucles d'itérations imbriquées, afin de déterminer le niveau de fonctionnement de l'enveloppe en régime permanent. L'une concerne la résolution du problème thermique, l'autre les coefficients de déclassement. Le schéma de calcul est présenté sur la **figure 17**.

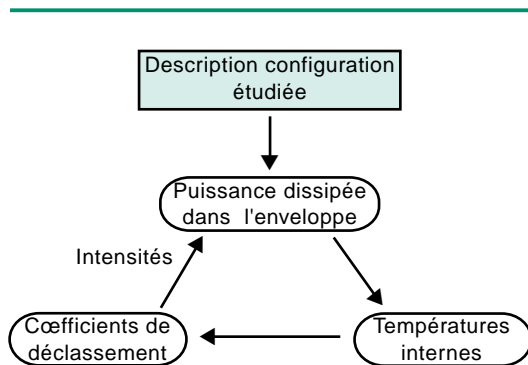


Fig. 17 : principe de fonctionnement des logiciels.

1re étape : description de la configuration, c'est-à-dire type d'enveloppe utilisé, nom des appareils et leur position. C'est à ce niveau que le programme utilise les caractéristiques des appareils contenues dans un fichier de données.

2e étape : découpage de l'enveloppe en sous volumes isothermes (nœuds de la modélisation nodale).

3e étape : début des boucles d'itération avec calcul :

- de la puissance dissipée (à la première itération les coefficients de déclassement sont pris égaux à 1),
- des coefficients de la matrice d'admittance à partir des équations de bilan,
- des températures internes (résolution du problème thermique),
- des nouveaux coefficients de déclassement puis comparaison avec les précédents. Si l'écart est jugé trop important (critère de convergence) on réitère un nouveau calcul définissant les nouvelles intensités traversant chaque appareil, puis de nouveau la puissance dissipée...

4e étape : sortie des résultats.

6.2 Description des données à fournir et des résultats obtenus

Données :

- type d'enveloppe (coffret, armoire, tableau) et matière,
- indice de protection,
- température ambiante autour de l'enveloppe,
- nombre de rangées d'appareils,
- nom des appareils permettant la recherche dans le fichier,
- configuration du tableau et position de l'appareillage.

Résultats :

- choix d'un jeu de barres horizontal et vertical (section) et intensité dans ces barres,
- puissance thermique totale dissipée dans le tableau,
- les intensités maximales d'utilisation I_{the} pour chaque appareil compte tenu de sa température environnante,
- éventuellement la température atteinte par les barres et son niveau dans les différentes zones du tableau.

6.3 Configurations modélisées

Bien sûr toutes les configurations d'installation ne peuvent être prises en compte par un tel programme. Seules les plus courantes ont été retenues, c'est-à-dire celles qui nous permettent de répondre à 90% des besoins ; cf. **figure 18** qui donne un exemple.

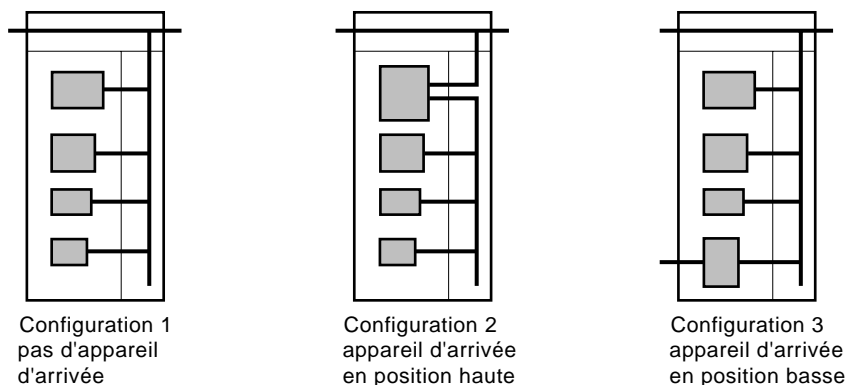


Fig. 18 : configurations modélisées.

6.4 Résultats

Cette approche « logiciel » est particulièrement intéressante car elle permet d'effectuer les différentes études ci-après :

Etude détaillée d'une configuration donnée pour optimiser la position d'un appareil ou le choix d'un jeu de barres, connaître la puissance dissipée par l'ensemble pour dimensionner une climatisation adaptée...

L'exemple suivant concerne une colonne d'un tableau industriel de puissance compartimenté, forme 2, contenant :

- un jeu de barres horizontal alimentant un appareil d'arrivée et une colonne adjacente,
- un appareil d'arrivée 2500 A,
- différents disjoncteurs boîtier moulé.

Le programme nous fournit entre autre :

- les coefficients de déclassement K_{decl} ,
- les intensités traversant chaque appareil, I_r .

Remarque sur le coefficient K_{div} :

Ce coefficient nous permet de tenir compte du coefficient de diversité ou de foisonnement départ par départ.

C'est-à-dire des niveaux de fonctionnement à un instant donné des différents appareils.

Ex. : à un instant donné 2 départs par exemple vont être sollicités au maximum et les autres à 0,5 de leur possibilité, d'où les conséquences sur le régime thermique de l'ensemble. Les résultats sont présentés sur la feuille de calcul **figure 19** .

Tableau de déclassement pour une configuration donnée

Cette possibilité d'utilisation du logiciel, assez proche de l'utilisation précédente, permet de rassembler, pour une configuration fréquente les déclassements des différents appareils en tenant compte de leur position réelle dans le tableau, des sections de conducteurs utilisées, des indices de protection et de la température ambiante extérieure.

L'exemple d'un tel tableau concernant des appareils installés dans une colonne d'un tableau industriel de puissance est présenté **figure 20** .

Masterbloc : MB 200 IP = 31
 Tableau avec appareil d'arrivée en position haute alimentée par le JdB horizontal.

Nom appareil	Position		Kdecl	Kdiv	Ia(A)	Ir(A)
M25 H	1	12	.88	1	2200	2200
NS630/ST	17	21	.93	1	586	518
NS630/ST	22	26	.96	1	605	534
NS400/ST	27	31	1	1	400	353
NS400/ST	32	36	1	1	400	353
NS250/D250	37	40	1	1	250	221
NS250/D250	41	44	1	1	250	221

JdB hor. : intensité - 2200 A
 section - 1 * 4b 100 * 5

JdB vert. : intensité - 2200 A
 section - 1 * 4b 80 * 5

Puissance totale dissipée : 1953W, dont :
 appareils : 593W - auxiliaire : 0W -
 JdB+dérivations : 1271W - JdB horizontal : 89W

Température JdB hor. : 95 °C
 Température Jdb vert. : 104 °C

Température ambiante : 35 °C
 T° toit : 70 °C - T° JdB hor. : 75 °C
 T° appareillage : haut - 68 °C / bas - 35 °C
 T° auxiliaire : haut - 52 °C / bas - 35 °C
 T° JdB+dériv. : haut - 77 °C / bas - 35 °C
 T°raccordement : haut - 58 °C : bas - 35 °C

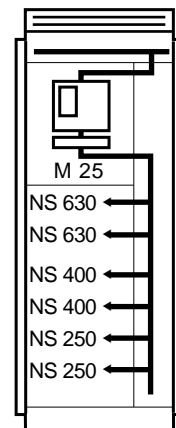


Fig. 19 : résultat du calcul pour une configuration donnée.

IP 31

T° amb	35	40	45	50	55
M 25	0,9	0,87	0,84	0,81	0,79
M 16	0,97	0,94	0,91	0,88	0,86
M 08	1	1	1	1	1

IP 42/54

T° amb	35	40	45	50	55
M 25	0,79	0,77	0,75	0,73	0,71
M 16	0,87	0,85	0,83	0,81	0,79
M 08	1	1	1	1	1

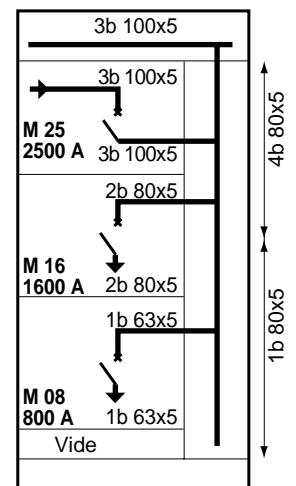


Fig. 20 : déclassement des disjoncteurs ci-dessus en fonction de la température ambiante.

Tableau de déclassement pour un type d'appareil

Pour la plupart des disjoncteurs boîtier moulé le déclassement est relativement indépendant de la configuration.

Les coefficients de déclassement sont donc établis, par excès, en plaçant successivement les appareils en haut de l'armoire ou du compartiment. Voir à titre d'exemple la **figure 21**.

Courbes caractérisant le comportement thermique d'un type d'enveloppe

Deux types de graphiques ont été établis :

■ un ensemble de courbes permettant de déterminer la température moyenne à l'intérieur d'une enveloppe donnée en fonction de la

puissance dissipée et de la température de l'ambiante extérieure cf. courbes **fig. 22** concernant un type d'armoire de distribution non cloisonnée,

■ des courbes permettant de déterminer les watts que ces enveloppes peuvent dissiper pour un échauffement donné, en fonction de leurs caractéristiques dimensionnelles.

Ex : T° ambiante ext. 35°C échauffement max souhaité $\Delta T = 30^\circ\text{C}$

□ armoire : hauteur 2 m, largeur 0,9 m, profondeur 0,4 m

puissance dissipable 850 W

□ armoire : hauteur 2 m, largeur 0,9 m, profondeur 0,6 m

puissance dissipable 1000 W (cf. **fig. 23**).

T° amb	IP 31					IP > 31				
	35	40	45	50	55	35	40	45	50	55
NS 100	100	100	100	100	95	100	95	90	85	80
NS 160	160	155	150	145	140	150	140	135	125	120
NS 250	235	225	220	210	200	205	195	180	170	165
NS 400	380	370	360	350	340	350	340	330	320	310
NS 630	540	520	510	500	485	485	475	465	450	440

Fig. 21 : exemple d'intensités (en A) de déclassement de disjoncteurs Compact NS installés dans une enveloppe BT donnée.

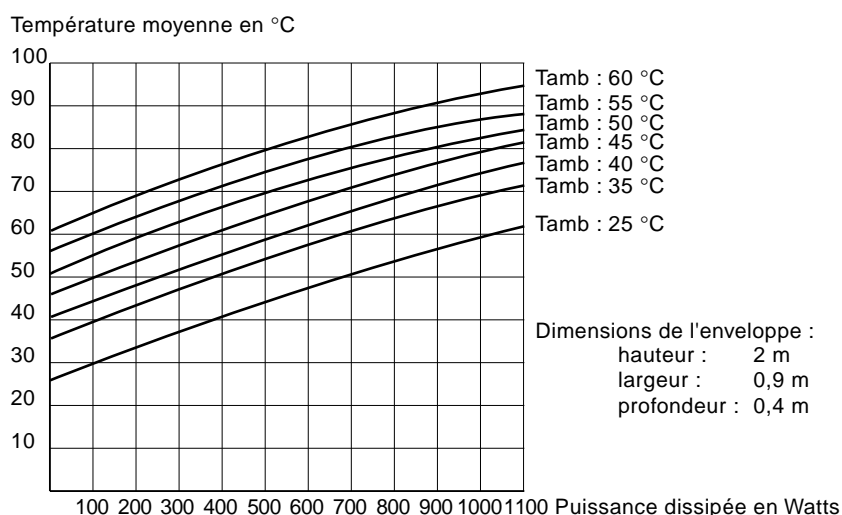
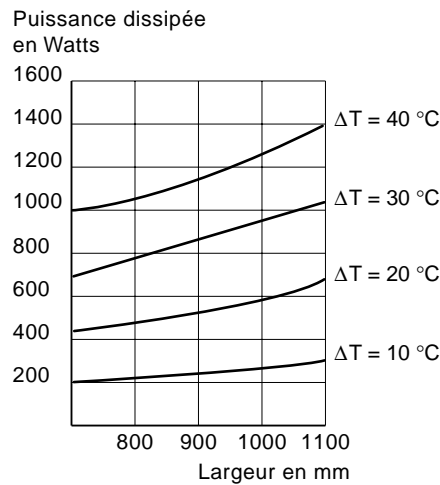


Fig. 22 : température moyenne de l'air à l'intérieur d'une armoire de distribution métallique IP2 et de forme 1.

Enveloppe de 400 mm de profondeur



Enveloppe de 600 mm de profondeur

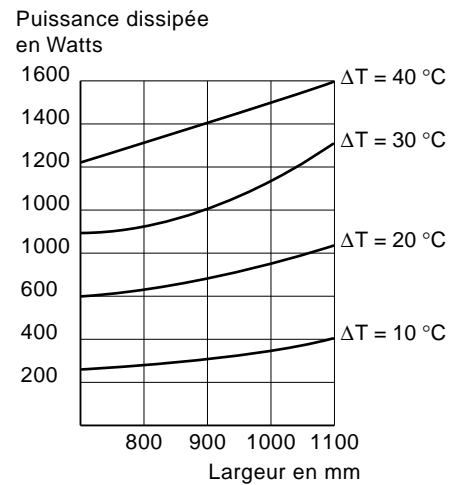


Fig. 23 : puissance dissipable par une enveloppe pour un échauffement donné en fonction de sa largeur. Courbes se rapportant à une armoire métallique de forme 1 de 2 m de haut.

6.5 Résultats expérimentaux

Des essais d'échauffement ont été réalisés au laboratoire Ampère de l'ASEFA sur divers types d'enveloppes : coffrets tôle ou plastique, armoire Prisma, tableau de distribution Masterbloc.

Lors de ces essais, les mesures effectuées ont été des mesures :

- de températures :
 - de l'air dans les différentes zones de l'enveloppe,
 - des conducteurs : jeu de barres et dérivations,
 - des points chauds des appareils (bilame, ambiante électronique) ;
- d'intensité,
- de paramètres intervenant dans la modélisation, en particulier les coefficients d'échange air/parois.

Ces mesures ont permis, d'une part de vérifier la conformité à la norme CEI 439.1 de certaines valeurs (cf. limites d'échauffement mentionnées dans le § 1.2 sur les normes), et d'autre part de valider le modèle.

En ce qui concerne les températures d'air, l'écart entre les valeurs mesurées et calculées dépend du type d'enveloppe modélisée, puisqu'au niveau de la modélisation les approches diffèrent selon que l'on considère des enveloppes compartimentées ou non.

Sur l'ensemble des tests effectués sur des tableaux, de différentes formes, (cloisonnés ou non cloisonnés), les écarts maxi constatés ont toujours été inférieurs à 6°C.

Les températures calculées pour les jeux de barres montrent également une bonne concordance avec les mesures et nous ont permis de valider le logiciel.

En ce qui concerne les intensités, les écarts sont en moyenne inférieurs à 5%.

Ainsi, lors d'une homologation récente d'une configuration du tableau Masterbloc en échauffement, le logiciel nous a permis de prévoir le niveau de fonctionnement du tableau.

7 Méthode proposée par le rapport CEI 890

Il n'y a pas si longtemps beaucoup d'armoires électriques étaient choisies et équipées/remplies, en fonction de l'expérience ; ceci en ce qui concerne le taux de remplissage et l'évaluation de la température dans l'armoire en fonctionnement. Par exemple : Température extérieure max 30°C et 60°C max à l'intérieur (les fabricants d'appareillage donnent le déclassement jusqu'à 60°C).

Cette pratique conduisait soit à une utilisation non optimale du matériel, soit à des fonctionnements intempestifs des protections ou à la nécessité pour l'exploitant de fonctionner portes ouvertes.

La méthode proposée par le rapport CEI, même s'il ne s'agit pas d'une norme mais d'un guide, est donc d'un intérêt évident. Elle est présentée en détails en annexe de la NFC 63410 ou dans le rapport de la CEI N° 890.

Nous devons en rappeler les bases, en montrer les limites et la comparer avec la méthode présentée dans le cahier technique.

Dans son principe, cette méthode s'applique à des enveloppes pour lesquelles on peut faire les hypothèses suivantes :

- répartition uniforme de la puissance dissipée,
- appareillage disposé de façon à ne pas gêner la circulation de l'air,
- pas plus de 3 séparations horizontales.

Données nécessaires :

- dimensions de l'enveloppe,
- puissance dissipée dans l'enveloppe (appareillage, conducteur),
- type d'installation (enveloppe isolée, ou à une extrémité...), (cf. **fig. 24**).

Calcul:

la température est calculée uniquement en 2 points de l'enveloppe :

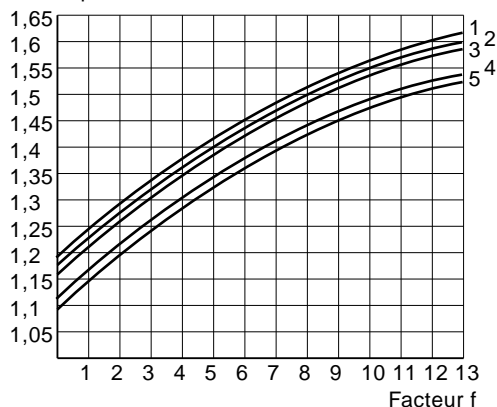
à mi-hauteur

$$T_{0,5} = T_a + \Delta T_{0,5} \text{ avec } \Delta T_{0,5} = dkP_W^{0,804}$$

- d est un coefficient qui prend en compte l'existence des séparations horizontales.
 - Si $A_e < 1,25 \text{ m}^2$, $d = 1$ (définition de A_e , cf. ci-dessous).
 - Si $A_e > 1,25 \text{ m}^2$, $d = 1$ avec et sans orifices de ventilation pour 0 séparation.
- $d = 1,05$ avec et sans orifices de ventilation pour 1 séparation
- $d = 1,15$ ou $1,10$ si orifices de ventilation pour 2 séparations
- $d = 1,30$ ou $1,15$ si orifices de ventilation pour 3 séparations

- k est une constante qui caractérise l'enveloppe ; sa valeur est déterminée sur des abaques (cf. **fig. 25**).

Facteur de répartition de température c



Courbe/type d'installation

- 1 Enveloppe séparée, détachée sur tous ses côtés
- 3 Enveloppe séparée, en montage mural
- 2 Première ou dernière enveloppe détachée
- 3 Enveloppe centrale, détachée
- 5 Enveloppe centrale, en montage mural
- 4 Enveloppe centrale, en montage mural et avec partie supérieure ouverte

Fig. 24 : facteur de répartition de température c pour enveloppes sans orifice de ventilation et avec une surface effective de refroidissement $A_e > 1,25 \text{ m}^2$.

Valeur de la surface effective de refroidissement A_e en m^2 Constante d'enveloppe k

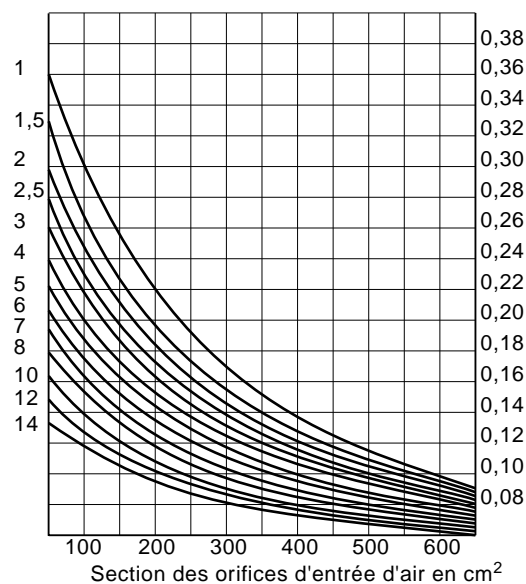


Fig. 25 : constante d'enveloppe k pour enveloppe avec orifice de ventilation et avec une surface effective de refroidissement $A_e > 1,25 \text{ m}^2$.

k est fonction de la surface d'échange de l'enveloppe A_e (m^2),

$A_e = \sum A_0 b$ où A_0 est la surface géométrique des différentes parois de l'enveloppe.

b est une constante qui tient compte du type de paroi et du type d'installation.

Valeurs de b :

□ partie supérieure exposée	b = 1,4
□ partie supérieure couverte	b = 0,7
□ faces latérales exposées	b = 0,9
□ faces latérales couvertes	b = 0,5
□ faces latérales d'enveloppes centrales	b = 0,5
□ partie inférieure	b = 0

■ Pw puissance dissipée en watts

au sommet de l'enveloppe :

$T_1 = T_a + \Delta T_1$ avec $\Delta T_1 = c \Delta T_{0,5}$ où $\Delta T_{0,5}$ représente l'échauffement précédent.

■ c est une constante d'échauffement déterminée à partir d'abaques

Ex. d'abaque cf. **figure 24**

c est fonction de A_e et d'un des deux facteurs f ou g

$$f = h^{1,35}/(LP) \text{ si } A_e > 1,25 \text{ m}^2$$

$$g = h^{1,35}/L \text{ si } A_e < 1,25 \text{ m}^2$$

Limites:

Les limites essentielles de cette méthode sont qu'elle :

■ s'applique bien à des enveloppes non compartimentées type armoire, coffret et non à des tableaux de puissance fortement compartimentés,

■ ne tient pas compte de la position des sources de chaleur qui le plus souvent ne sont pas réparties de façon uniforme.

Comparaison avec notre approche

On constate que les deux approches donnent des résultats similaires pour les armoires non compartimentées et à sources de chaleur réparties (cf. **figure 26**).

En ce qui concerne les enveloppes fortement cloisonnées la localisation des sources de chaleur et les échanges entre les différentes zones influencent beaucoup l'échauffement !

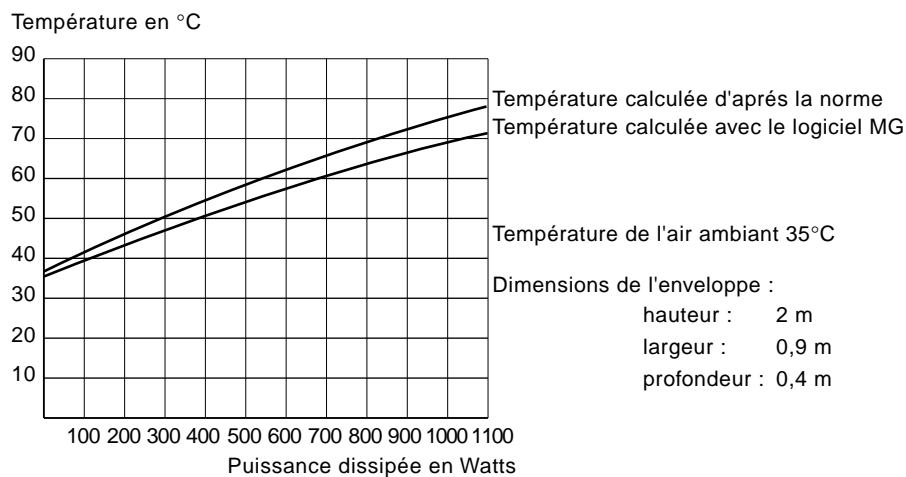


Fig. 26 : température de l'air à mi-hauteur d'une armoire de distribution métallique IP2 et de forme 1.

8 Conclusion

L'importance des tableaux électriques dans la distribution n'est plus à démontrer.

A l'heure où la disponibilité de l'énergie électrique et la sûreté de fonctionnement deviennent incontournables, la maîtrise thermique des tableaux électriques est un objectif fondamental.

Les normes concernant les enveloppes et les produits précisent les limites thermiques à ne pas dépasser.

Il restait aux professionnels à devenir des « architectes thermiciens » de la conception des enveloppes et des tableaux électriques ; c'est aujourd'hui chose faite, même pour les tableaux cloisonnés.

Schneider

Direction Scientifique et Technique,
Service Communication Technique
F-38050 Grenoble cedex 9
Télécopie : (33) 04 76 57 98 60

Réalisation : Sodipe (26).
Impression : CLERC Fontaine - 1500
- 100 FF-