



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

Republique Algerienne Democratique Et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

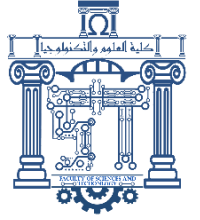
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة العربي التبسي - تبسة

Université Larbi Tébessi- Tébessa –

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie électrique



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de Master Académique

En : Electrotechnique

Spécialité : Electrotechnique industrielle

Par:

DRAIFIA Smail

MAHIDDINE Fathi

Sujet

***Analyses du comportement thermique d'un
compartiment isolant au gaz de commutation utilisant la
méthode de réseau thermique***

Présenté, le 20/06/2021, devant le jury composé de :

M^{me}_BOUGUERNE Abla

MCB

Président

Mr_ BENDAKIR Abdelhakim

MAA

Rapporteur

M^{me}_ NAHAL OUASSILA

MCC

Examineur

Année Universitaire : 2020/2021

Remerciement

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à mon encadreur de mémoire, Je la remercie de m'avoir encadré, orienté, aidé et conseillé.

J'adresse mes sincères remerciements à tous les professeurs, intervenants et toutes les personnes qui par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques ont guidé mes réflexions et ont accepté à me rencontrer et répondre à mes questions durant mes recherches.

Je remercie mes très chers parents, qui ont toujours été là pour moi, « Vous avez tout sacrifié pour vos enfants n'épargnant ni santé ni efforts.

Vous m'avez donné un magnifique modèle de labeur et de persévérance. Je suis redevable d'une éducation dont je suis fier ».

Je remercie mes frères et mes sœurs pour leur encouragement.

Enfin, je remercie tous mes Ami(e)s que j'aime tant, Pour leur sincère amitié et confiance, et à qui je dois ma reconnaissance et mon attachement.

À tous ces intervenants, je présente mes remerciements, mon respect et ma gratitude.

Dédicace :



A mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études,

A mes chères sœurs pour leurs encouragements permanents, et leur soutien moral,

A mes chers frères, pour leur appui et leur encouragement,

A toute ma famille pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire,

Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fruit de votre soutien infaillible,

Merci d'être toujours là pour moi.



MAHIDDINE FATHI

Dédicace :



A mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études,

A mes chères sœurs pour leurs encouragements permanents, et leur soutien moral,

A mes chers frères, pour leur appui et leur encouragement,

A toute ma famille pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire,

Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fruit de votre soutien infaillible,

Merci d'être toujours là pour moi.



DRAIFIA SMAIL

SOMMAIRE

<i>Introduction Générale</i>	1
<i>Chapitre I: Postes électriques haute tension</i>	
<i>I.1 Introduction</i>	4
<i>I.2 Postes électriques haute tension</i>	4
<i>I.3 Types des postes électriques</i>	4
<i>I.3.1 Postes de transformation (poste source)</i>	4
<i>I.3.2 Postes d'interconnexion</i>	5
<i>I.3.3 Postes mixtes</i>	5
<i>I.3.4 Postes de distribution</i>	5
<i>I.4 L'objectif des postes</i>	6
<i>I.5 Les différents éléments du poste</i>	7
<i>I.5.1 Éléments constituant les postes HT</i>	8
<i>I.6 Transformateurs</i>	8
<i>I.6.1 Transformateurs de puissance</i>	8
<i>I.6.2.1 Principe de fonctionnement</i>	9
<i>I.6.4 Autotransformateur</i>	11
<i>I.8 Sectionneur à haute tension</i>	12
<i>I.9 Jeu de barre</i>	12
<i>I.10 Protections</i>	13
<i>I.11 Familles de poste</i>	13
<i>I.11.1 Postes AIS (ouverts)</i>	13
<i>I.11.2 Poste GIS blindés</i>	14
<i>I.11.3 Postes blindés</i>	15
<i>I.12 Construction</i>	16
<i>I.13 Compartimentage et enveloppes</i>	17
<i>I.14 Montage du GIS</i>	18
<i>I.14.1 Propriétés du gaz SF₆</i>	18
<i>I.14.2 Durée de vie des GIS</i>	19
<i>I.14.3 Intérêt</i>	19
<i>I.14.4 Comparatif</i>	20
<i>I.15 Le parafoudre</i>	21

I.15.1 Description et fonctionnement	21
I.16 Tendances futures.....	22
I.17 Avantages des postes GIS.....	23
I.18 Entretien de l'installation du poste.....	24
I.18.1 Défauts et leurs causes.....	24
I.18.2 Différentes opérations d'entretien.....	25
I.18.3 Entretien des batteries.....	25
I.19 Les problèmes engendrés.....	26
Conclusion.....	27
Chapitre II: Modes de transfert de chaleur	
Introduction.....	29
II-1 Modes du transfert de la chaleur	29
II-1-1 La conduction	30
II-1-2 La convection	30
II-1-3 Le rayonnement.....	31
II-2 Comparaison des modes de transfert	32
II-2-1 Combinaison des différents modes de transferts	32
II-3 Lois fondamentales du transfert de la chaleur.....	33
II-3-1 Loi fondamentale de la conduction (loi de J. Fourier).....	33
II-3-2 Interprétation mathématique.....	35
II-4 La conductivité thermique.....	36
II-4-1 Matériaux anisotropes	36
II-5 L'équation de la chaleur en conduction.....	37
II-5-1 Démonstration.....	37
II-5-2 Conditions aux limites isothermes.....	38
II-5-3 Conditions aux limites à flux constant.....	38
II-5-4 Échanges convectifs sur une paroi	40
II-5-5 Echanges radiatifs sur une paroi.....	40
II-5-6 Condition de passage entre 2 solides.....	41
II-5-7 Conductivité et diffusivité thermique	41
II-5-7-1 Equation de la chaleur en régime permanent	42
II-6 Exemples de résolution de l'équation de la chaleur en conduction.....	43
II-6-1 Cas d'un mur plan.....	43
II-6-2 Association de murs en série ou en parallèle	44
II-6-3 Mur avec sources internes	45

II-6-3-1 <i>Températures d'extrémité sidentiques</i>	45
II-6-3-2 <i>Températures d'extrémités différentes</i>	46
II-7 <i>Mur avec conditions de convection aux parois</i>	47
II.7.1 <i>Conduction dans une coque cylindrique</i>	49
II.7.2 <i>Conduction dans une coque sphérique</i>	50
II.7.3 <i>Remarques finales sur la conduction</i>	51
II.7.4 <i>Analogie avec la diffusion de masse</i>	51
II.7.5 <i>Résolution numérique d'un problème de conduction</i>	52
II.8 <i>Loi fondamentale de la convection (loi de I. Newton)</i>	52
II.8.1 <i>Lois du rayonnement</i>	52
II.8.2 <i>La loi de Stefan-Boltzmann</i>	55
II.8. <i>La loi de Planck</i>	55
II.9 <i>Loi de Wien</i>	56
II.9.1 <i>Enoncé</i>	56
II.9.2 <i>Les échangeurs thermiques, un procédé industriel de la mécanique des fluides</i>	58
Conclusion	59
Chapitre III: Modélisation électrothermique d'un disjoncteur	
III.1 <i>Introduction</i>	61
III.2 <i>Méthode thermique nodale</i>	61
III.2.1 <i>Principe de la modélisation nodale</i>	62
III.2.1.1 <i>Décomposition nodale</i>	63
III.2.1.2 <i>Création du réseau de conductances</i>	63
III.2.2 <i>Principe de la modélisation par MTN</i>	64
III.2.3 <i>Type du modèle thermique</i>	65
III.2.3.1 <i>Modèle thermique comportemental</i>	65
III.2.3.2 <i>Modèle thermique structurel (géométrique)</i>	65
III.3 <i>Conduction thermique par méthode nodale</i>	66
III.3.1 <i>Conductances thermiques par conduction</i>	66
III.3.2 <i>Résistance thermique de conduction</i>	67
III.3.2.1 <i>Élément géométrique parallélépipédique</i>	67
III.3.2.2 <i>Élément géométrique cylindrique</i>	68
III.4 <i>Convection thermique par la méthode nodale</i>	68
III.4.1 <i>Conductance thermique par convection</i>	69
III.4.2 <i>Résistance thermique de convection</i>	70
III.5 <i>Rayonnement thermique par méthode nodale</i>	71

<i>III.5.1 Conductances thermiques par rayonnement</i>	71
<i>III.5.2 Résistance thermique de rayonnement</i>	72
<i>Conclusion</i>	73
<i>Chapitre VI: Résultats de simulation et discussions</i>	
<i>VI.1. Introduction</i>	75
<i>VI.2. Définition de logiciel EMTP-ATP</i>	75
<i>VI.2.1 Résistance thermique de la conduction</i>	75
<i>VI.2.2 Résistance thermique pour le rayonnement</i>	76
<i>VI.2.3 Résistance thermique pour la convection</i>	77
<i>VI.2.4 Sources de chaleur</i>	78
<i>VI.3 Validation de modèle ATP</i>	79
<i>VI.3.1 Approche réseau thermique</i>	79
<i>VI.3.2 Approche analytique</i>	80
<i>VI.3.3 Résistance thermique pour la convection</i>	80
<i>VI.3.4 Résistance thermique pour le rayonnement</i>	81
<i>VI.4 Simulation par ATP</i>	81
<i>VI.4.1 Application du modèle sur système des jeux barres triphasé omnibus isolées au SF6</i>	83
<i>VI.4.2 Approche analytique</i>	84
<i>VI.4.3 Résultats de la simulation</i>	85
<i>Conclusion</i>	87
<i>Conclusion générale</i>	89
<i>Bibliographie</i>	91

LISTE DES FIGURES

<i>Figure I.1</i>	<i>page6</i>
<i>Figure I.2</i>	<i>page 6</i>
<i>Figure I.3</i>	<i>page 9</i>
<i>Figure I.4</i>	<i>page 11</i>
<i>Figure I.5</i>	<i>page 15</i>
<i>Figure I.6</i>	<i>page16</i>
<i>Figure I.7</i>	<i>page16</i>
<i>Figure I.8</i>	<i>page 17</i>
<i>Figure I.9</i>	<i>page 18</i>
<i>Figure I.10</i>	<i>page 24</i>
<i>Figure II.1</i>	<i>page 31</i>
<i>Figure II.2</i>	<i>page 34</i>
<i>Figure II.3</i>	<i>page 35</i>
<i>Figure II.4</i>	<i>page 37</i>
<i>Figure II.5</i>	<i>page 40</i>
<i>Figure II.6</i>	<i>page 41</i>
<i>Figure II.7</i>	<i>page 43</i>
<i>Figure II.8</i>	<i>page 45</i>
<i>Figure II.9</i>	<i>page 46</i>
<i>Figure II.10</i>	<i>page 47</i>
<i>Figure II.11</i>	<i>page 49</i>
<i>Figure II.12</i>	<i>page 49</i>
<i>Figure II.13</i>	<i>page 50</i>
<i>Figure II.14</i>	<i>page 52</i>
<i>Figure II.15</i>	<i>page 56</i>
<i>Figure II.16</i>	<i>page 56</i>
<i>Figure II.17</i>	<i>page 56</i>

<i>Figure II.18</i>	<i>page 58</i>
<i>Figure II.19</i>	<i>page 59</i>
<i>Figure III.1</i>	<i>page 68</i>
<i>Figure III.2</i>	<i>page 69</i>
<i>Figure III.3</i>	<i>page 70</i>
<i>Figure III.4</i>	<i>page 71</i>
<i>Figure III.5</i>	<i>page 72</i>
<i>Figure III.6</i>	<i>page 73</i>
<i>Figure III.7</i>	<i>page 75</i>
<i>Figure III.8</i>	<i>page 76</i>
<i>Figure VI.1</i>	<i>page 79</i>
<i>Figure VI.2</i>	<i>page 80</i>
<i>Figure VI.3</i>	<i>page 81</i>
<i>Figure VI.4</i>	<i>page 82</i>
<i>Figure VI.5</i>	<i>page 83</i>
<i>Figure VI.6</i>	<i>page 84</i>
<i>Figure VI.7</i>	<i>page 85</i>
<i>Figure VI.8</i>	<i>page 85</i>
<i>Figure VI.9</i>	<i>page 86</i>
<i>Figure VI.10</i>	<i>page 87</i>
<i>Figure VI.11</i>	<i>page 89</i>
<i>Figure VI.12</i>	<i>page 89</i>

Résumé :

Le comportement thermique des chambres d'un disjoncteur à isolation gazeux nécessite la modélisation des mécanismes de transfert radial de tous les éléments constituant le dispositif, en prenant compte les propriétés électriques non linéaires des éléments conducteurs. L'utilisation d'équivalents thermiques pour évaluer le comportement thermique de compartiment d'isolement dans un poste blindé a un taux de calcul extrêmement faible avec une précision suffisante pour le travail de conception. L'idée de base de MTN est de décrire un problème thermique par un réseau de circuits équivalent, puis résoudre les équations du réseau. L'approche est basée sur la similitude entre les paramètres électriques et thermiques. La méthode nécessite que l'utilisateur spécifie plus de paramètres géométriques

Mots clés; le poste blindé à isolation par gaz, le modèle ATP-EMTP, les postes blindés (GIS). la méthode MTN, simulation ATP Draw, Méthode thermique nodale, couplage électrothermique

Introduction

Générale

Introduction Générale

Les équipements des réseaux moyenne, haute et très haute tension de l'alimentation électrique doivent être protégés contre les surtensions dépassant la capacité d'isolation de l'équipement. Les surtensions peuvent être causées par des événements naturels, tels que la foudre, à la suite d'une opération de commutation ou en raison d'événements de défaillance. La propriété essentielle de ces systèmes complexes est qu'ils doivent assurer la fourniture d'électricité aux consommateurs et continuer à fonctionner d'une manière satisfaisante même lorsqu'une perturbation aléatoire est produite.

Un des aspects les plus importants pour le dimensionnement de ce type des dispositifs des manœuvres (commutation) est celui des contraintes thermiques. Le comportement thermique des chambres d'un disjoncteur à isolation gazeux (SF_6) nécessite la modélisation des mécanismes de transfert de chaleur radiale de tous les éléments constitués le dispositif, en prendre compte les propriétés électriques non linéaires des éléments conducteurs, dès les premières études. En effet, lorsqu'il écrête une surtension, le disjoncteur absorbe de l'énergie, ce qui provoque une augmentation de température dans la chambre de distinction. Cet échauffement provoque un accroissement des pertes Joule.

L'utilisation d'équivalents thermiques pour évaluer le comportement thermique de compartiment d'isolement dans un poste blindé a un taux de calcul extrêmement faible avec une précision suffisante pour le travail de conception. L'idée de base de MTN est de décrire un problème thermique par un réseau de circuits équivalent, puis résoudre les équations du réseau. L'approche est basée sur la similitude entre les paramètres électriques et thermiques. La méthode nécessite que l'utilisateur spécifie plus de paramètres géométriques

Pour présenter notre travail de master, nous proposons un mémoire en quatre chapitres. Le premier nous le consacrons aux généralités sur les postes électriques, en particulier les postes blindés (GIS).

Le deuxième chapitre aborde les aspects théoriques du transfert de la chaleur. Tout d'abord, les lois fondamentales du transfert de la chaleur seront présentées au sein d'un dispositif. Ces considérations, couplées au principe de conservation de l'énergie, aboutissent à l'équation de la chaleur régissant le comportement thermique d'un système.

Le troisième chapitre dédié à la détermination de la température des composants de compartiment d'isolement nécessite de recourir à des techniques de caractérisation spécifiques, compte

tenu de la difficulté de mise en œuvre de la méthode MTN, cette méthode numérique apparaît comme une méthode alternative aux méthodes expérimentales, pour une analyse complète des problèmes thermiques.

Dans quatrième chapitre, nous présentons nos résultats de validations et ceux de différentes applications en utilisant les logiciels de simulation ATP Draw.

Nous terminons notre travail par une conclusion générale de ce travail.

Chapitre I

Postes électriques haute tension

I.1 Introduction

Les postes électriques sont des éléments principaux du réseau électrique. Ils reçoivent l'énergie électrique, la transforment (en passant d'un niveau de tension à une autre) et la répartissent (en assurant la jonction des différents réseaux électriques). On y trouve un certain nombre d'appareils électriques (transformateurs, disjoncteurs, sectionneurs...) qui participent au bon fonctionnement du réseau.

I.2 Postes électriques haute tension

Selon la définition de la commission électrotechnique internationale, un poste électrique est la « partie d'un réseau électrique, localisée en un même lieu, comprenant essentiellement les extrémités des lignes de transport ou de distribution, de l'appareillage électrique, des bâtiments, et, peut-être, des transformateurs ».

Un poste électrique est par conséquent un élément du réseau électrique permettant de la fois à la transmission, puis de la redescendre en vue de sa consommation par les utilisateurs (spécifiques ou industries). Les postes électriques se trouvent par conséquent aux extrémités des lignes de transmission ou de distribution. Dans les autres langues il est connu sous le nom (sous-station). [6]

I.3 Types des postes électriques

Il existe plusieurs types de postes électriques :

I.3.1 Postes de transformation (poste source)

Un réseau électrique est un système dont le poste constitue une pièce majeure dans la mesure où c'est le lieu (le nœud) d' où le réseau est:

- Organiser (configuration de la topologie) ;
- Surveiller (fonction de monitoring) ;
- Protégé (action des protections) ;

Le poste peut être considéré comme une barre (ou des barres) sur laquelle sont connectées des dérivations, on répartit en :

- Groupes de production qui produisent de l'énergie
- Charges qui consomment de l'énergie active, réactive

- Lignes aériennes (ou souterraines) qui assurent le lien entre les différents nœuds

L'évolution des réseaux T.H.T. et H.T. durant les dernières années a entraîné une évolution notable dans la réalisation des postes.

Les dimensions des postes étant imposées par les distances d'isolation dans l'air et les contraintes environnementales et de pollution.

I.3.2 Postes d'interconnexion

Qui comprennent à cet effet un ou plusieurs points communs triphasés appelés jeu de barres, sur lesquels différents départs (lignes, transformateurs, etc.) de même tension peuvent être aiguillés. L'objectif est d'interconnecter plusieurs lignes électriques. [3]

I.3.3 Postes mixtes

Les postes mixtes, les plus fréquents, qui assurent une fonction dans le réseau d'interconnexion et qui comportent en outre un ou plusieurs étages de transformation. [3]

I.3.4 Postes de distribution

Le but est d'abaisser le niveau de tension pour distribuer l'énergie électrique aux clients résidentiels ou industriels.

Il existe deux modes d'emplacement du poste de distribution selon la puissance du transformateur:

- **Poste sur support**



Figure I.1 Poste de distribution sur support

- **Poste cabiné (maçonné)**



Figure I.2 Poste de distribution cabiné

L'aspect des postes électrique fluctue fortement suivant leurs fonctions. Les postes peuvent être en surface à l'intérieur d'une enceinte, souterrains, dans des bâtiments qu'ils desservent. [3]

I.4 L'objectif des postes

Les postes électriques ont 3 fonctions principales :

- le raccordement des plusieurs réseaux d'électricité.
- l'interconnexion entre les différentes lignes électriques.
- la transformation de l'énergie en différents niveaux de tension.

Pour la transmission de l'énergie électrique, il est économiquement intéressant d'augmenter la tension, car cela limite les déperditions d'énergie par effet joule. En effet, à puissance délivrée constante, plus la tension est élevée et plus l'intensité passant dans les câbles est faible, par conséquent moins d'échauffement, ce qui permet entre autres de diminuer la section des câbles, d'où une économie énorme. Les niveaux utilisés pour les transmissions à longue distance sont le plus souvent entre 400 kV et 800 kV, qualifiés de très haute tension (appellation actuelle : haute tension B). La tension est ensuite réduite pour une consommation à un niveau de tension courant, en Europe 230 V, en Amérique 110 V.

Prenons l'exemple typique d'une centrale nucléaire. L'électricité va être produite par la centrale, puis va transiter par :

- Le poste d'évacuation de la centrale (la tension va passer d'environ 20 kV à 400 kV pour être injecté sur le réseau de transport d'électricité).
- Plusieurs postes d'interconnexion 400 kV (trajet de plusieurs centaines de Km).
- Un poste de transformation 400 / 225 kV.

- Un poste de transformation 225 / 63 kV ou 225 / 90 kV (après un trajet de quelques centaines de Km en 225 kV).
- Plusieurs postes d'interconnexion 63 kV ou 90 kV (trajet de plusieurs dizaines de Km).
- Le poste finale d'une grosse usine raccordée en 63 kV ou 90 kV.
- Certains postes de transformation permettent de transformer la tension directement de 400kV à 63 kV ou 90 KV.
- En règle générale la tension 63 kV est utilisée dans L'est de la France et le 90 kV dans l'ouest.

Dans le cas d'un spécifique, l'électricité devra transiter par un poste source, qui est un poste de transformation 63 / 20 kV, pour être alors injectée sur le réseau de distribution.

Certains postes sources sont équipés de transformateurs 225/20 kV et même 400 /20 kV. Par la suite la tension est une nouvelle fois modifiée par un transformateur 20 kV / 400 V avant d'arriver chez particulier. [3]

I.5 Les différents éléments du poste

On distingue parfois les éléments d'un poste en « élément primaires » (les équipements haute tension) et « éléments secondaires » (équipements basse tension). Parmi les équipements primaires figurent :

- Transformateur électrique
- Auto transformateur électrique
- Disjoncteur à haute tension
- Sectionneur
- Sectionneur de mise à la terre Parafoudre
- Transformateur de courant
- Transformateur de tension
- Combiné de mesure (courant + tension) Jeu de barres
- Batterie de condensateurs
- Réactance shunt
- Parmi les éléments secondaires figurent :
- Relais de protection

- Equipements de surveillance
- Equipements de contrôle
- Système de télé conduite
- Comptage d'énergie
- Alimentations auxiliaires
- Equipements de télécommunication [2]

I.5.1 Éléments constituant les postes HT

Les éléments d'un poste se distinguent en deux parties :

- Les éléments primaires qui sont les équipements à haute tension.
- Les éléments secondaires regroupent des transformateurs, des disjoncteurs, des sectionneurs, des jeux de barre et des batteries de condensateurs. [2]

I.6 Transformateurs

Les transformateurs utilisés dans les postes électriques sont de quatre types :

I.6.1 Transformateurs de puissance

Le transformateur de puissance est certainement le dispositif qui a permis l'essor puis la domination des réseaux alternatifs pour le transport, la distribution et l'utilisation de l'énergie électrique. La première fonction d'un transformateur a été l'élévation de la tension de transport afin de réduire le courant et donc les pertes joules générées dans les lignes. Cette élévation est bien entendue allée de pair avec l'abaissement de la tension aux points d'utilisation. D'un point de vue plus général, un transformateur est un élément indispensable à l'interconnexion des différents réseaux d'énergie. [7]



Figure I.3 Un transformateur de puissance dans un poste électrique.

I.6.2 Transformateur de courant

Les transformateurs de courant (TI ou TC) qui :

- a) Abaissent la valeur des courants de circulation
- b) Permettent aussi commander l'ouverture d'appareils de protection en cas de défaut (surintensité). [2]

I.6.2.1 Principe de fonctionnement

Le primaire N_1 peut être constitué d'un conducteur unique traversant le circuit magnétique du TC, le courant I_1 est le courant que l'on veut mesurer et I_2 est l'image d' I_1 qui circule dans l'enroulement N_2 . Les deux courants sont liés par un rapport de transformation : On mesure le courant I_2 en mettant le secondaire S1 – S2 du TI en court-circuit.

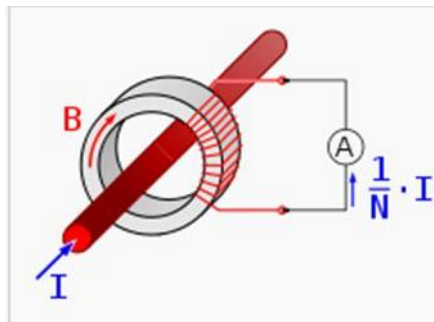
Note importante : Le sens de branchement du TC ou TI est important car une inversion provoque une erreur de déphasage qui introduit une erreur de mesurage et par conséquent du comptage de l'énergie.

On ne doit en aucun cas « ouvrir » le circuit II d'un TC sous peine de voir apparaître entre ses bornes une tension qui peut atteindre plusieurs kV : cette manœuvre entraîne la destruction du TC et peut blesser gravement l'utilisateur.

Dans les réseaux haute tension où des courants de plusieurs kA transitent, la mesure de ces courants élevés est difficile. Pour la faciliter, les transformateurs de courant ont pour rôle de diviser la valeur du courant à mesurer par un facteur constant. Cette démarche permet également de standardiser les équipements de mesure du courant et de les isoler d'électriquement du réseau haute tension.

L'équipement de mesure connecté à son secondaire est en général un ampèremètre, mais on peut également brancher un wattmètre ou des relais de protection. Tous sont conçus pour mesurer des courants de quelques ampères.

La caractéristique la plus importante d'un transformateur de courant est donc son rapport de transformation, exprimé par exemple sous la forme 400 A/1 A. [2]



FigureI.4 Schéma de principe d'un transformateur de courant avec uneseule spire au primaire.

I.6.3 Transformateur de tension

Un transformateur de tension est un « transformateur de mesure dans lequel la tension secondaire est, dans les conditions normales d'emploi, pratiquement proportionnelle à la tension primaire et déphasée par rapport à celle-ci d'un angle voisin de zéro, pour un sens approprié des connexions ».

Il s'agit donc d'un appareil utilisé pour la mesure de fortes tensions électriques. Il sert à faire l'adaptation entre la tension élevée d'un réseau électrique HTA ou HTB (jusqu'à quelques

centaines de kilovolts) et l'appareil de mesure (voltmètre, ou wattmètre par exemple) ou le relais de protection, qui eux sont prévus pour mesurer des tensions de l'ordre de la centaine de volts. [6]

I.6.4 Autotransformateur

Un autotransformateur est un transformateur dont on connecte le primaire et le secondaire de sorte qu'ils aient un enroulement en commun. Un schéma de principe est donné à la figure suivante, avec le nombre de spires de chaque enroulement. [2]

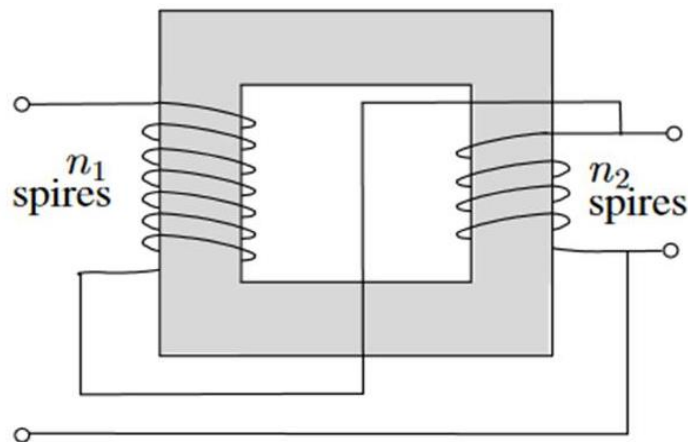


Figure I.4 Schéma d'un autotransformateur.

I.7 Disjoncteurs à haute tension

Un disjoncteur à haute tension est destiné à établir, supporter et interrompre des courants sous sa tension assignée (la tension maximale du réseau électrique qu'il protège), selon la définition donnée par la Commission électrotechnique internationale. Il opère à la fois :

dans des conditions normales de service, par exemple pour connecter ou déconnecter une ligne dans un réseau électrique;

dans des conditions anormales spécifiées, en particulier pour éliminer un court-circuit dans le réseau provoqué par la foudre (Voir aussi la partie spécifique) ou d'autres causes.

De par ses caractéristiques, un disjoncteur est l'appareil de protection essentiel d'un réseau à haute tension, car il est seul capable d'interrompre un courant de court-circuit et donc d'éviter que le matériel connecté sur le réseau soit endommagé par ce court-circuit.

Le principe de fonctionnement d'un disjoncteur séparant des contacts dans un gaz (air, SF₆) ou dans un milieu isolant. [2]

I.8 Sectionneur à haute tension

La fonction principale d'un sectionneur haute tension est de pouvoir séparer (un disjoncteur isole mais ne sépare pas < notions de distance >) un élément d'un réseau électrique (ligne à haute tension, transformateur, portion de poste électrique, ...) afin de permettre à un opérateur d'effectuer une opération de maintenance sur cet élément sans risque. Le sectionneur doit :

- Indiquer sans ambiguïté sa position : on parle parfois de « coupure visible », sinon « certaine » quand les contacts ne sont pas directement visibles.
- Pouvoir être cadenassé pour garantir à l'opérateur qu'un circuit isolé ne sera pas refermé par inadvertance.
- Posséder une isolation entre les bornes, qui garantisse à l'opérateur qu'une surtension ne puisse pas mettre en défaut cette isolation et remettre malencontreusement le circuit sous tension.
- Ils doivent aussi pouvoir supporter des courants de court-circuit entre 25KA et 63KA. [3]

I.9 Jeu de barre

Les jeux de barre sont généralement des barres plates ou des tubes creux en cuivre ou en aluminium (les plus grands jeux de barres peuvent atteindre un diamètre de 120mm et une section de 1000mm²). En haute tension les jeux de barres peuvent être « posés » sur des isolants, dans ce cas ce sont des tubes. Ils peuvent être « tendus », c'est-à-dire que les jeux de barre sont flexibles et suspendus par des chaînes isolantes à des structures métalliques. Les jeux de barres permettent de relier les différentes composantes d'un poste électrique, ce qui les rend très importants mais aussi très fragiles. En effet, si un jeu de barres est soumis à un court-circuit, c'est le poste entier qui est mis hors tension. Généralement, plusieurs jeux de barres connectés en parallèle permettent d'empêcher ce problème et permettent de faire la maintenance d'un jeu de barres sans mettre le poste entier hors service. [2]

I.10 Protections

Les différentes branches d'un réseau de transport (transformateurs, lignes jeux de barre) peuvent être le siège d'un défaut (court-circuit monophasé, court-circuit biphasé, coupure d'une ou de deux phases de l'une des deux extrémités de la coupure et quelles que soient sa nature et son origine, ce défaut doit être éliminé immédiatement du réseau sous peine de causer des dégâts importants aux matériels, c'est le rôle des protections.

Un système de protection peut être défini comme étant un ensemble de dispositifs plus ou moins complexes dont le rôle est de détecter le défaut et de commander l'ouverture du disjoncteur protégeant l'organe en cause.

Une protection doit assurer :

La détection de l'état du réseau, ce qui nécessite un organe de mesures de certaines grandeurs caractéristiques (courant, tension...).

La comparaison de ces grandeurs caractéristiques mesurées, à des valeurs fixées à l'avance ce qui nécessite un organe de comparaison.

L'envoi d'un ordre et l'exécution d'une manœuvre.

Un certain nombre de contrôles peuvent bloquer, accélérer ou temporiser l'envoi de l'ordre. Les protections doivent donc avoir les qualités suivantes : fiabilité, sensibilité, rapidité, sélectivité (n'éliminer que la plus petite fraction du réseau).

L'élimination de défaut, c'est-à-dire la mise hors tension rapide de l'élément en cause, a pour finalité d'une part de limiter les dégâts qui pourraient être causés à l'élément protégé et d'autre part et surtout de préserver le reste du réseau électrique. [1]

I.11 Familles de poste

I.11.1 Postes AIS (ouverts)

Postes AIS ouverts les postes à isolation dans l'air, également appelés postes « Conventionnels » ou AIS (Air Insulated Switchgear). On parle parfois de « postes ouverts ». L'isolement diélectrique est aussi par l'air à la pression atmosphérique.

Dans ces conditions, on a défini des distances d'isolement et de sécurité à partir des quelles ont été obtenues les dimensions géométriques des installations.

Il est existant deux postes :

- Postes extérieurs : à double jeux de barres, un jeu de barre (PS), poste avec barre de transfert.
- Postes intérieurs : Ils ont même composantes sauf ils sont construits dans 1 bâtiment. [1]



Figure I.5 Poste classique extérieur.

I.11.2 Poste GIS blindés

Les poste à isolation gazeuse, appelés, aussi postes sous enveloppe métallique, ou GIS (Gas Insulated Switchgear). On parle par fois de « postes blindés ».

Afin de réduire l'encombrement des postes, on a remplacé l'air à la pression normale par gaz lourd, inodore, incolore, stable et ininflammable l'hexafluorure soufre (SF_6). Ce gaz à air comprimé à 3,5 bars est obtenu dans des enveloppes en aluminium étanches et relie à la terre, à raison d'une enveloppe par phase.

Le poste blindé ou GIS (sous enveloppe métallique) se présente donc comme un assemblage de caissons remplis de SF_6 et contenant, non seulement les conducteurs, mais dirigés aussi les appareils à haute tension pour des raisons de sécurité, ces caissons sont divisés en compartiments étanches et surveillés individuellement. [3]



Figure I.6 Poste blindé.

I.11.3 Postes blindés

Ou postes GIS (Gas Insulated Switchgear), ils ont l'avantage d'espace par rapport aux postes ouverts, la technique est de remplacer l'isolation par l'air par un autre isolant qui est un gaz composé de l'hexafluorure de soufre **SF6** (lourd, inodore, incolore, stable et ininflammable). Ce gaz est comprimé à 3.5 bars et obtenu dans des enveloppes en aluminium étanches et reliées à la terre. [3]



Fig I.7 poste blindé.

La réalisation d'un tel ou tel poste dépend de l'endroit où on doit réaliser le poste, comme par exemple les zones très chaudes ou les zones très froides dont on construit des postes blindés.



Fig I.8 le poste GIS au niveau du champ de Zarzaitine.

I.12 Construction

Le poste blindé se compose de plusieurs compartiments distincts, séparés par des isolateurs de cloisonnement étanches aux gaz. Conformément à la fonction attribuée à chaque pièce, certains compartiments sont aussi divisés en plusieurs parties.

Chaque compartiment est équipé de sa propre surveillance de densité et d'un branchement de gaz, les raccords de gaz et les raccords des dispositifs de contrôle de la densité sont équipés de soupapes de retenue afin d'éviter toute fuite de gaz.

Les postes GIS contiennent les mêmes composants d'un poste conventionnel, et se sont :

- Jeu de barres
- Disjoncteurs
- Sectionneurs /Sectionneurs de mise à la terre
- Transformateurs de puissance
- Transformateurs de courant/ Tension
- Parafoudre /Traversées isolées.

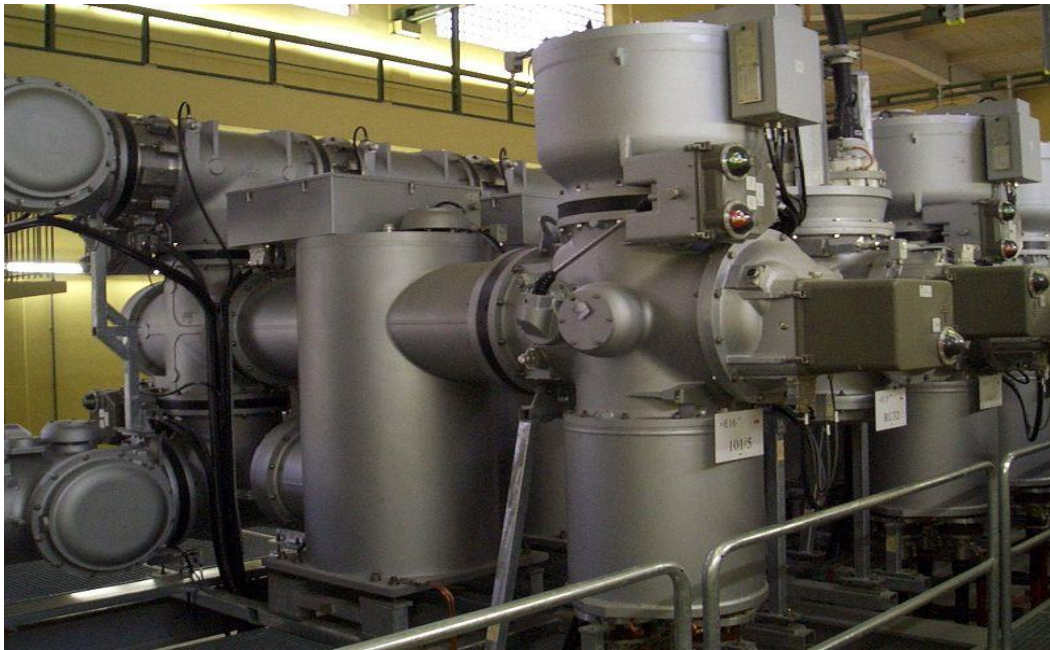


Fig I.9 Compartiment disjoncteur d'un GIS

De plus des composants spécifiques ont été créés :

- Traversées SF₆/air permettant le raccordement du poste aux lignes aériennes ou aux transformateurs de puissance par câble aérien.
- Enveloppes d'extrémités de câble haute tension permettant les départs par câbles souterrains isolés.
- Gaines de raccordement, isolées au SF₆, vers les transformateurs de puissance [3]

I.13 Compartimentage et enveloppes

Les travées d'un poste, les jeux de barres et les gaines de raccordement sont divisés en un certain nombre de compartiments étanches de gaz. Ceci permet

- Le traitement et le remplissage plus aisés de volumes plus réduits
- Un montage sur site facilité.
- Une continuité de service indispensable lors d'intervention de maintenance. Dans ce cas, il faut réduire la pression de SF₆ à l'intérieur du compartiment où se fait l'intervention tout en conservant la pression nominale de SF₆ dans les autres parties du poste restées sous tension et en service.
- Des extensions de poste sans coupure. Les compartiments sont séparés par des

barrières étanches isolantes ayant une triple fonction

- Support mécanique des conducteurs.
- Isolateur entre les parties sous tension et les enveloppes mises à la terre.
- Barrière étanche au gaz entre deux compartiments adjacents. On peut noter que ces barrières doivent pouvoir résister à des pressions différentielles dues à :
- La mise sous vide d'un compartiment alors que le compartiment adjacent est rempli à pression nominale. (Ceci se produit lors des opérations de traitement sur site avant remplissage du compartiment)
- La montée en pression dans un compartiment dans le cas accidentel d'un amorçage interne. Les barrières doivent résister à la surpression afin d'éviter la propagation de l'arc interne aux compartiments adjacents.

Les premiers postes étaient à phases séparées. L'expérience acquise a permis, au début des années 80, une plus grande compacité due à l'installation des trois phases dans une enveloppe commune et ceci pour des tensions allant jusqu'à 145 kV. Cela a entraîné une réduction du nombre de composants au prix d'une plus grande complexité des parties actives et des isolateurs supports de conducteurs. Les postes à phases séparées autorisent en général des architectures plus complexes. [8]

I.14 Montage du GIS

Le raccordement des modules s'effectue de manière à faciliter les extensions ou les transformations ultérieures du GIS. Les isolateurs de cloisonnement étanches au gaz entre les compartiments à gaz limitent au maximum les conséquences des défauts sur les modules voisins. [3]

I.14.1 Propriétés du gaz SF₆

L'hexafluorure de soufre (SF₆) remplit les critères nécessaires à l'isolation électrique, il a une excellente rigidité électrique et une bonne capacité de transfert thermique.

Il est également stable chimiquement inerte, non inflammable et non toxique ; le seul danger pour la santé est le risque de suffocation.

Sa température de décomposition est de 600° C, sa plage température d'utilisation pour les appareils électriques varie entre -30° C et 40° C.

Sa bonne rigidité électrique provient du fait que le SF6 est très électronégatif, il absorbe les électrons qui ne peuvent ainsi pas ioniser le gaz et ne peuvent pas mener à une décharge électrique.

Le SF6 a par ailleurs une propriété remarquable pour l'extinction des arcs électriques, il se décompose sous l'effet de l'arc et se recompose extrêmement rapidement permettant au gaz de retrouver sa rigidité électrique. Ses capacités d'isolation se régénèrent après un arc électrique. [4]

I.14.2 Durée de vie des GIS

La plupart des GIS ont été conçus pour avoir une durée de vie de 25 à 30ans, de nos jours elle peut y'aller jusqu'à 40ans. [3]

I.14.3 Intérêt

Un GIS occupe beaucoup moins d'espace qu'une station conventionnelle, environ 10 %. Il ne présente pas de risque de fuite d'huile ou d'explosion due à son inflammation. Leur fiabilité est très élevée, en particulier parce que les matériels sont protégés contre les agressions de l'environnement : insensibilité aux aléas climatiques donc peu de vieillissement, pas de risque de défaut électrique dû à l'avifaune.

Ils sont simples à maintenir, en particulier parce qu'en dehors des traversées il n'y a pas de pièces isolantes à nettoyer ; l'essentiel du travail de maintenance consiste en une vérification du bon fonctionnement. De plus la pollution n'a pas d'influence sur leurs propriétés. Ils sont également moins sensibles aux séismes.

Pour ces raisons les GIS sont utilisés principalement dans les espaces urbains ou industriels où la place est rare et dans toutes les zones où les problèmes de pollution sont importants (zones à haute activité industrielle, zone désertiques et soumis aux vents de sables, régions côtières soumises aux embruns). Leur compacité, et la facilité d'installation en bâtiment permettent également aux GIS de se fondre plus facilement dans leur environnement et ainsi de ne pas dégrader l'esthétique d'un lieu. De même dans les zones côtières ou en montagne les problèmes causés respectivement par le sel et la neige sont contournés.

L'installation d'un poste blindé est considérablement plus simple que celle d'un poste traditionnel, le travail de BTP est beaucoup plus limité et les pièces peuvent déjà être pré assemblées en usine. Les GIS sont également silencieux. Sur les matériels modernes, l'enveloppe

métallique des GIS forme une cage de Faraday qui rend l'installation insensible aux interférences électromagnétiques extérieures et inversement rend ses propres émissions nulles. [6]

I.14.4 Comparatif

Des études effectuées par ABB ont montré que pour les réseaux de distribution urbains, la combinaison de disjoncteurs HT isolés au gaz (GIS) et de câbles HT présente d'importants avantages par rapport aux systèmes formés de disjoncteurs isolés à l'air (AIS) et de lignes aériennes.

En raison de leur compacité et de leur flexibilité, les postes GIS peuvent être installés à proximité des centres de consommation d'énergie, ce qui permet une configuration beaucoup plus efficace, tant pour le système HT que pour le réseau de distribution MT.

Les économies en investissements et en frais d'exploitation compensent largement les frais plus élevés des GIS et des câbles. Les avantages s'étendent à une fiabilité accrue et à la possibilité d'implanter un poste GIS complet dans un bâtiment existant, par exemple lorsqu'un terrain adéquat n'est pas disponible.

Les deux types de postes réalisent exactement la même fonction et le choix de l'un et de l'autre dépend de différents facteurs. [2]

Valeurs de mesure du moteur	V	110-125
Plage de tolérance	%	+10/-15
Puissance du moteur	W	600
Courant de démarrage du moteur	A	40
Courant permanent	A	9

Tableau I.1: caractéristique du moteur universel VSA.

- Moteur compound VCD :

Valeurs assignées du moteur	V	110-125
Plage de tolérance	%	+10/-15
Puissance du moteur	W	600
Courant de démarrage du moteur	A	30
Courant permanent	A	6

Tableau I.2: caractéristique du moteur compound VCD.

I.15 Le parafoudre

I.15.1 Description et fonctionnement

Dans l'appareillage à isolation gazeuse SF6, on utilise des parafoudres comme protection contre les surtensions atmosphériques et les surtensions de manœuvre. Le parafoudre peut être monté sur n'importe quelle bride disponible du GIS.

Il s'agit d'un parafoudre blindé triphasé équipé de son propre compartiment. Le cloisonnement du compartiment est réalisé à l'aide d'un isolateur à cloison.

Les conducteurs du parafoudre comprennent des disques résistants empilés. Ils sont fabriqués en oxyde métallique. La surface de contact de chaque disque est recouverte d'un revêtement métallique conducteur. La hauteur de la pile dépend de la tension de l'installation de distribution. Des barres de traction et ressorts spéciaux assurent la pression de contact entre les disques résistants à n'importe quelle température.

L'enveloppe métallique et la base du parafoudre sont en aluminium. Selon le modèle de parafoudre, la base comprend des traversées pour le montage de compteur de surtension ou la mesure du courant. Par ailleurs, l'extérieur de la base dispose de trous taraudés utilisés pour mettre à la terre. L'enveloppe métallique sert de support au limiteur de pression et a deux raccords de gaz. Le capteur de densité du gaz est monté sur l'un des deux raccords de gaz. [3]

Valeurs assignées		
Tension U_{eff}	KV	Jusqu'à 25% au dessus de U_c
Fréquence	Hz	50/60
Tension assignée	kV	198
La tension d'amorçage aux chocs de foudre normal	KV	Intensif: 514.8 Non intensif : 594

La tension d'amorçage aux chocs sur front ou latension d'amorçage maximale	KVcrête	Intensif : 594 Non intensif : 683.1
Courant de décharge (valeur de crête)	kA	10
Température ambiante admissible (sans chauffage)	0C	+45 à -30
Pression minimale de fonctionnement/Pression de remplissage (à 20 ⁰ C)	KPa	520/600
Poids sans SF6	Kg	110
Poids de remplissage SF6	Kg	4
Longueur max. L	Mm	940

Tableau I.3: caractéristiques technique du parafoudre.

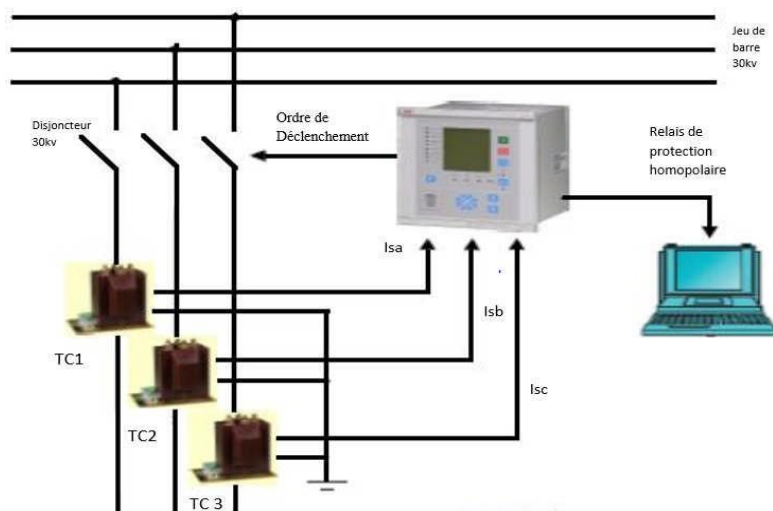


Fig I.10 schéma globale qui représente le système de protection. [6]

I.16 Tendances futures

Les GIS continuent leur développement avec notamment une recherche constante de compacité. À cette fin, des GIS dont les trois phases sont placées sous une même enveloppe se répandent, les niveaux de tensions disponible avec cette technologie sont toujours plus haut. L'intégration des composants est toujours plus forte permettant également de gagner en volume.

Par ailleurs dans les postes basse et moyenne tension on emploie de plus en plus de disjoncteurs sous vide pour interrompre le courant, toutefois l'usage de ces interrupteurs pour la haute tension n'est pas à prévoir dans un futur immédiat. Un point d'amélioration concerne la maintenance que les constructeurs tentent de rendre toujours plus facile. Enfin les premiers GIS installés commençant à être relativement anciens, leur entretien et leur capacité d'évolution sont à prendre en compte pour envisager leur remplacement ou leur maintien en service^{24,36}.

Le développement des installations de courant continu haute tension (HVDC) pousse en 2012 au développement de GIS en courant continu (DC). L'isolation diélectrique doit être adaptée par rapport à un GIS en tension alternative, les contraintes diélectriques étant très différentes. Un des problèmes rencontrés est lié aux particules métalliques et aux charges en général, celles-ci dérivent en effet toujours dans la même direction dans un GIS DC : elles s'accumulent alors à certains endroits, alors que dans un GIS AC elles oscillent, la tension n'ayant pas une polarité constante. Ces accumulations changent le comportement diélectrique de l'isolation. Des pièges à particules permettent d'améliorer le comportement de l'isolation vis-à-vis de ces éléments. Par ailleurs, les éléments de l'isolation ont un comportement résistif en présence de tension continue, alors qu'en tension alternative ils ont un comportement principalement capacitif.

À plus long terme, les limiteurs de courant de court-circuit pourraient faire évoluer significativement la conception des GIS. L'introduction des semi-conducteurs de puissance est également une piste explorée pour interrompre le courant dans les installations électriques³⁶. [6]

I.17 Avantages des postes GIS

Les postes blindés à isolation SF₆ (GIS) requièrent uniquement 5% de l'encombrement des postes ouverts classiques. C'est pour cette raison que cette technologie représente une solution intéressante et économique pour les zones urbaines et les centres industriels. Le GIS est caractérisée par :

- Une excellente sécurité de fonctionnement
- Une grande fiabilité
- Une longue durée de vie
- L'absence d'entretien

- Un encombrement minimal
- Un faible poids
- Une conception modulaire
- Un montage rapide
- Une protection de terre sécurisée.

Pour ces raisons les postes GIS sont utilisés dans les espaces urbains ou industriels et dans toutes les zones où les problèmes de pollution sont importants (zones à haute activité).

Leurs compacités et la facilité d'installation en bâtiment permettent aux GIS de ne pas dégrader l'esthétique d'un lieu, de même dans les zones côtières ou en montagne les problèmes causés par le sel et la neige sont contournés.

L'installation d'un poste blindé est considérablement plus simple que celle d'un poste traditionnel et les postes GIS sont également silencieux.

Sur le matériel moderne, l'enveloppe métallique des GIS forme une cage de Faraday qui rend l'installation insensible aux interférences électromagnétiques extérieurs et inversement rend ses propres émissions nulles.

Les GIS ont l'avantage par rapport aux disjoncteurs conventionnels de permettre une grande intégration des composants. Ainsi les disjoncteurs peuvent également servir de sectionneurs, les sectionneurs de mise à la terre, les capteurs de courant peuvent être combinés à ceux de tension... Cela permet de gagner en compacité et en simplicité¹⁹. Par ailleurs l'usage de technologies innovantes ou non-habituelles pour la mesure de la tension et du courant, tel que les bobines de Rogowski, l'effet Pockels ou l'effet Faraday, connaît un important développement dans les GIS. [3]

I.18 Entretien de l'installation du poste

I.18.1 Défaits et leurs causes

La présence de particules métalliques dans un GIS réduit particulièrement ses propriétés d'isolation, elles sont issues à la fois de la fabrication et de l'assemblage des GIS, mais également

des parties mobiles qui le composent, qui se déplacent dans les tubes et créent des décharges partielles quand elles s'approchent du conducteur, elles se chargent par la même occasion et se déplacent alors en fonction de la tension appliquée à l'installation, ce qui réduit son pouvoir isolant.

Pour limiter ce phénomène, des zones à faible champ électrique viennent capter les particules (pièges à particules).

La présence d'humidité dans le gaz est également à éviter, car il peut se condenser sur les surfaces isolantes et détériorer ses propriétés.

Les décharges partielles sont en général à éviter car elles entraînent un vieillissement accéléré de l'isolation. [4]

I.18.2 Différentes opérations d'entretien

L'exploitation des postes blindés n'est soumise à aucune influence due à l'encrassement, l'humidité et autres. C'est pour cela que le poste blindé nécessite très peu d'entretien tels que :

- Dépoussiérage du poste
- Contrôle de la densité de gaz par un capteur de densité :
- La pression mesurée et la température relevée sont alors comparées à une valeur de consigne de la pression.
- Le disjoncteur ne peut être commuté que lorsqu'il est soumis à une pression de service minimale de SF6 600kpa
- Contrôle du taux d'humidité par un Hygromètre
- Vérification d'étanchéité du poste par détecteur de fuites
- Mesure de la résistance des puits de mise à la terre du poste électrique. [4]

I.18.3 Entretien des batteries

- Appoint de l'eau distillée
- Dé sulfatation des bornes de raccordement
- Des tests d'isolement des différents équipements du poste tels les disjoncteurs, les transformateurs de puissance, les protections, et mesure de la rigidité diélectrique des transformateurs.

Cette opération est effectuée chaque année par un organisme technique spécialisé en la matière (ENACT) comme garantie de sécurité des installations du poste auprès des organismes d'assurance. [4]

I.19 Les problèmes engendrés

L'implantation d'un poste électrique est loin de poser les problèmes environnementaux suscités par l'implantation d'une centrale électrique ou d'une ligne à haute tension.

Les problèmes engendrés sont essentiellement :

- L'esthétique : les postes électriques utilisant une technologie à isolation dans l'air sont fortement déconseillés en zone urbaine de par la surface nécessaire pour implanter les différentes parties (qui doivent être isolées entre elles) et pour des raisons de sécurité. On préférera des postes à isolation gazeuse installés en bâtiment (solution idéale en zone urbaine) voire en sous-sol, la surface étant réduite au maximum (4 à 6 fois moins que pour un isolement en espace libre).
- Les nuisances sonores : les phénomènes de striction dans les transformateurs engendrent un bruit continu. Le bruit des ventilateurs pour les transformateurs de fortes puissances peut être gênant pour le voisinage.
- Les nuisances magnétiques : chaque site doit faire l'objet d'une étude de réduction des champs électromagnétiques résultant des fuites des circuits magnétiques. Les effets de ces fuites sont visibles sur les télévisions ou tout écrans à tube par une légère danse de l'image. Elles doivent toujours être inférieures aux normes 25 μT pour être sans effet sur la santé. Le Parlement Européen a recommandé un seuil de 0,25 micro Tesla.

En ville, les postes électriques d'Enedis peuvent être des bâtiments de 12 m². Ils peuvent aussi avoir été décorés.

Aspect économique : À cause de leur plus haut niveau de technologie et de leurs coûts de développement plus élevés, les GIS sont en général plus chers que les postes conventionnels. Toutefois cet écart de coût a tendance à baisser au fil des ans, de plus les coûts de maintenance étant moins élevés pour les GIS le coût initial est partiellement amorti. Enfin la place moindre occupée permet de faire des économies sur le terrain à acquérir. [6]

Conclusion

Ce premier chapitre est consacré à des généralités sur les postes électriques, nous avons étudié le poste blindé à isolation par gaz, en allant de la constitution jusqu'à les inconvénients.

Chapitre II
Modes des
transferts
de chaleur

Introduction

Le transfert thermique est la science qui tente à prédire le transfert d'énergie entre les molécules ou les particules de la matière à différentes températures. Le but est d'expliquer la manière et de prédire le taux d'échange de la chaleur sous certaines conditions spécifiques. Il Complémente les deux premiers principes de la thermodynamique par des lois expérimentales additionnels afin d'établir les proportions de transfert d'énergie.

Les phénomènes de transfert thermique et en particulier de la chaleur, ont une importance décisive pour l'étude et le fonctionnement des appareils tels que ; les générateurs de vapeur, les fours, les échangeurs de chaleur, les condenseurs, ...etc. En raison de développement rapide de l'industrie et l'accroissement de la demande et du prix de l'énergie, l'utilisation efficace d'une installation (d'échange de chaleur) pour une dépense d'énergie minimale est le but recherché dans tous les cas.

II-1 Modes du transfert de la chaleur

Lorsque deux systèmes sont à des températures différentes, le système le plus chaud cède de la chaleur au plus froid. Il y a échange thermique ou encore transfert thermique entre ces deux systèmes. Cette situation se rencontre dans de nombreuses situations industrielles (moteurs thermiques ou même électriques, centrales électriques au fuel au gaz, etc..., électronique) ou domestique (chauffage de l'habitat). Un transfert d'énergie donne lieu à un flux de chaleur qui correspond à un déplacement de l'énergie du plus chaud vers le plus froid.

Comme on le verra par la suite, le flux de chaleur dont la densité locale est notée Φ est une grandeur vectorielle, ce qui signifie qu'un flux de chaleur est caractérisé non seulement par son intensité mais aussi par sa direction. Il est défini en chaque point de l'espace et a l'unité d'une densité surfacique de puissance (W/m²). Il existe trois modes essentiels de transferts de chaleur : la conduction, le rayonnement et la convection. [9]

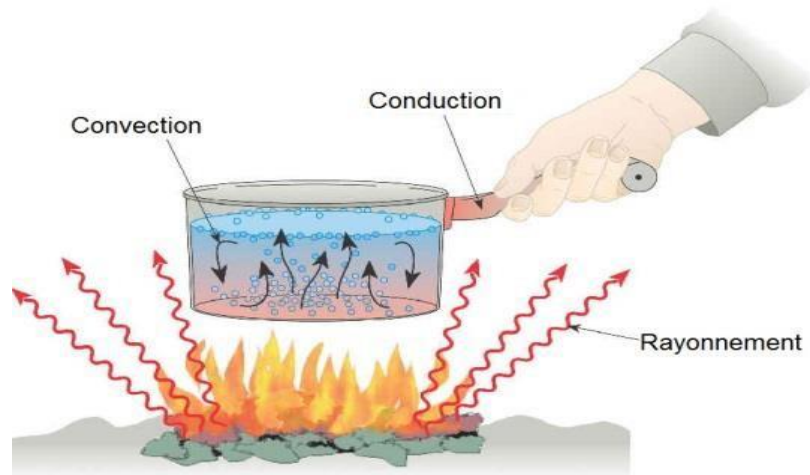


Fig II.1 Modes du transfert de la chaleur

II-1-1 La conduction

La conduction est définie comme étant le mode de transmission de la chaleur au sein d'un milieu opaque (solide, liquide ou gazeux), sans déplacement de la matière, en présence d'un gradient de température. Elle s'effectue selon deux mécanismes différents, une transmission par vibration des molécules ou atomes et une transmission par les électrons libres. Ce mode se produit au sein d'une même phase au repos ou mobile, en présence d'un gradient de température. Dans ce cas, le transfert de chaleur résulte d'un transfert d'énergie cinétique d'une molécule à une autre molécule adjacente. Ce mode de transfert est le seul à exister dans un solide opaque (qui absorbe tous les rayons). Pour les solides transparents, une partie de l'énergie peut être transmise par rayonnement. Avec les fluides (gaz ou liquides), la convection et le rayonnement peuvent se superposer à la conduction.[10]

II-1-2 La convection

La convection consiste essentiellement en la transmission de l'énergie par le mouvement ou le déplacement macroscopique d'une parcelle (grand nombre de molécules), généralement d'un fluide d'une région à autre. Ce mécanisme est accompagné toujours par le transfert d'énergie dû au mouvement moléculaire et qui représente le côté conductif de ce mode. On distingue deux types de convection :

La convection naturelle (convection libre) où le mouvement des particules est dû aux différences de température qui sont imposées au fluide. La différence de température implique une différence de masses volumiques (déplacement des particules, dilatation), exemple (chauffage de l'air pour une montgolfière, chauffage de l'eau dans un récipient).

La convection forcée où le mouvement des particules résulte de la pression appliquée au fluide par l'intermédiaire des moyens mécaniques, (d'une pompe par exemple). Le transfert de la chaleur par convection, se produit entre deux phases dont l'une est généralement au repos et l'autre en mouvement, en présence d'un gradient de température. Le mouvement du fluide peut résulter de la différence de masses volumiques due aux différences de températures. [9]

II-1-3 Le rayonnement

Le rayonnement est le transfert d'énergie électromagnétique d'un milieu à haute température vers un autre milieu à basse température sans aucun support matériel (il peut s'effectuer dans le vide). En général, tout corps opaque ou partiellement opaque porté à une température supérieure à zéro Kelvin rayonne de l'énergie dans toutes les directions. Cette énergie est transportée sous forme d'une onde électromagnétique dont la propagation n'exige pas du support matériel. Ce type de transport de chaleur est analogue à la propagation de la lumière et il ne nécessite aucun support matériel, contrairement aux écoulements. Les gaz, les liquides et les solides sont capables d'émettre et d'absorber les rayonnements thermiques.

❖ Remarques

Dans de nombreux problèmes de transformation d'énergie thermique, les trois modes de transfert de la chaleur coexistent mais, généralement, au moins une des trois formes pourra être négligée, ce qui simplifiera le traitement mathématique du processus de transfert.

Considérons le cas de forgeage d'un outil par le feu, où peut être visualisé les trois modes de transfert de chaleur en même temps. [9]

II-2 Comparaison des modes de transfert

Mode de transfert	Matière de transfert	Milieu de transfert	Transport de matière
Conduction	Solides et fluides	Au sein d'un seul corps ou par contact entre deux corps	Non
Convection	Fluides	Au sein d'un seul fluide ou au contact entre un solide et un fluide	Oui
Rayonnement	Solides, fluides et vide	A partir d'un corps rayonnant vers un autre	Non

Tableau II.1 Méthode de transfert [10]

II-2-1 Combinaison des différents modes de transferts

Dans beaucoup de situations, il y a coexistence de 2 ou même 3 des modes de transferts thermiques décrits précédemment.

Fort heureusement, il est fréquent qu'un mode soit prépondérant et simplifie l'analyse. Avant de finir ce paragraphe, signalons que certains échanges de chaleur s'accompagnent d'un changement d'état (vaporisation, condensation, fusion, congélation).

Ces phénomènes se comportent alors comme une source (ex. de la condensation) ou un puits de chaleur (ex. de la vaporisation). [10]

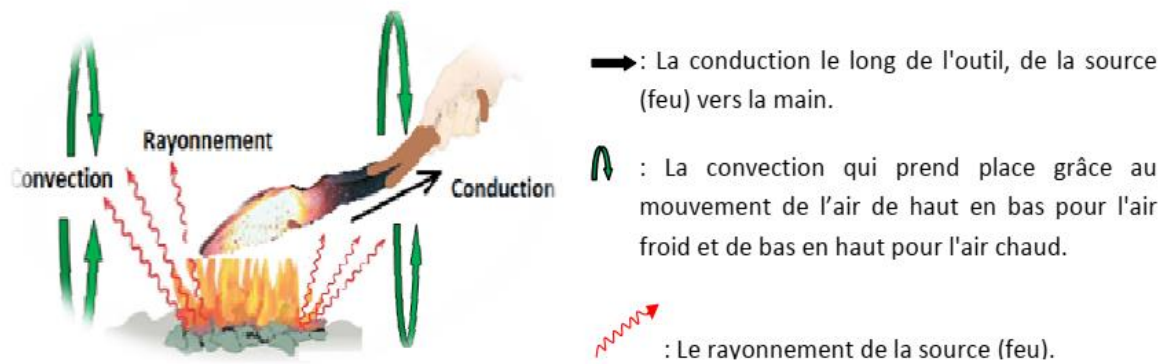


Fig II.2 illustration des trois modes du transfert de la chaleur

II-3 Lois fondamentales du transfert de la chaleur

II-3-1 Loi fondamentale de la conduction (loi de J. Fourier)

Rappelons que la conduction est le seul mode de transfert de chaleur possible dans un solide (sauf pour quelques solides transparents comme le verre qui laissent passer un rayonnement électromagnétique). C'est un mode de transfert sans transport de matière.

La loi fondamentale de la transmission de la chaleur par conduction, a été proposée par le et physicien Français, Jean Baptiste Joseph Fourier en 1822.

Considérons une plaque plane (D), de surface (S) et d'épaisseur (e) (voir Fig.II-2). Soit dQ, la quantité de chaleur échangée entre la plaque et l'air ambiant pendant le temps dt . On définit le flux de chaleur (flux thermique; Φ) comme la puissance échangée entre la surface S de la plaque et le milieu extérieur.

$$\Phi = \frac{dQ[J]}{dt[s]}; [W] \quad (\text{II-1})$$

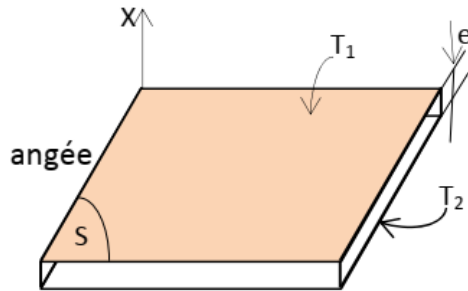


Fig II.3 Plaque plane

On définit la densité de flux thermique comme la puissance échangée par unité de surface de la plaque:

$$\varphi = \frac{dQ[J]}{S dt[m^2.s]} ; \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (II.2)$$

Les principes fondamentaux de la thermodynamique nous font savoir que: L'énergie est conservée en l'absence d'une source de chaleur; La chaleur transmise passe toujours du corps chaud vers le corps froid dans notre cas : $(T_1 - T_2)$.

On peut vérifier expérimentalement que :

$$Q = K \cdot \frac{S}{e} \cdot (T_1 - T_2) \quad (II.3)$$

Tels que ;

Q : la quantité de chaleur échangée à travers la surface (S) ; K : le facteur de proportionnalité appelé conductivité thermique qui est une caractéristique du matériau, son unité de mesure est $[W/m.K]$ ou $[kcal/h.m.C]$; Pour un élément infinitésimal, ds, la relation (1-3) s'écrit:

$$dQ = d\phi = -K \cdot ds \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \quad (II.4)$$

Le signe (-) : pour tenir compte du sens de flux thermique, le gradient qui va de la plus grande grandeur à la plus petite est négative.

L'équation (II-4) est attribuée au mathématicien et physicien Français J. B. Fourier qui en 1822 énonça sa loi et qui peut se traduire comme suit : «En tout point d'un milieu isotrope, la densité de flux thermique instantané, est proportionnelle à la conductivité thermique du milieu et

au gradient de température»

La forme vectorielle de cette loi qui exprime la densité de flux thermique est définie comme étant la quantité de chaleur transmise par unité de surface, soit :

$$\vec{\varphi} = -K. \overrightarrow{\text{grad}T} \quad (\text{II.5})$$

❖ **Remarque**

Par convention, $\vec{\varphi}$ est compté positivement dans le sens d'écoulement de la chaleur, c'est-à-dire vers les températures décroissantes. $\overrightarrow{\text{grad}T}$ est un vecteur porté par le même axe mais de sens contraire à $\vec{\varphi}$ (de petites valeurs vers les grandes valeurs) d'où le signe négatif de la loi de Fourier. [11]

II-3-2 Interprétation mathématique

La densité de flux thermique est donnée par :

$$\varphi = \frac{\emptyset}{S} = \frac{K}{e}(T_1 - T_2) \quad (\text{II.6})$$

Pour un élément infinitésimal (ds), cette dernière relation s'écrit :

$$\varphi = K. \frac{\partial T}{\partial x} \quad (\text{II.7})$$

Pour écrire l'équation de la conduction de la chaleur sous une forme mathématique nous devons adopter un signe conventionnel selon le sens du flux thermique par exemple :

$$T_1 > T_2, T_1 \rightarrow T_2$$

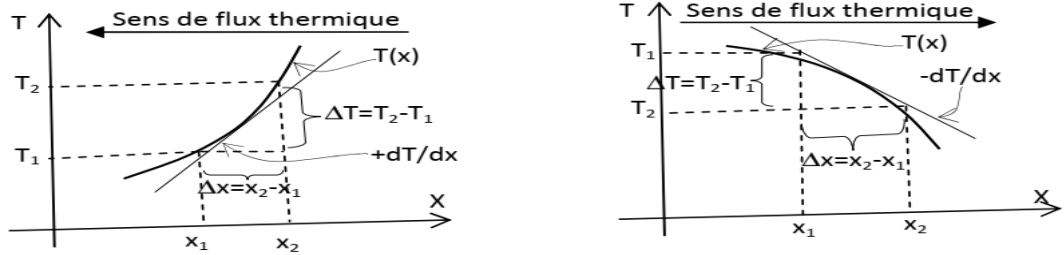


Fig.II.4 Interprétation mathématique de la densité de flux thermique

Comme le deuxième principe de la thermodynamique implique nécessairement, que la chaleur s'écoule des points les plus chauds vers les points les plus froids, le flux thermique serait donc positif lorsque le gradient de température ($\partial T / \partial x$) est négatif.

- On remarque de la figure (Fig.1-3b) que :

$$\frac{\Delta T}{\Delta x} = \frac{T_2 - T_1}{x_2 - x_1} = -\frac{dT}{dx}; T_1 > T_2 \quad (\text{II.8})$$

Pour que le flux soit positif, l'équation (II-4) s'écrit avec un signe négatif :

$$q = -K \cdot S \cdot \frac{dT}{dx} \quad (\text{II.9})$$

$-\frac{dT}{dx}$ le gradient de la température dans la section, c'est-à-dire, le rapport de la variation de température à la distance parcouru par le flux thermique. [11]

- De l'équation (II-5):

$$\varphi = -K \cdot \frac{dT}{dx} \Leftrightarrow - \int_{T_1}^{T_2} K \cdot dT = \int_{x_1}^{x_2} \varphi \, dx \Leftrightarrow \varphi \cdot (x_2 - x_1) = -K \cdot (T_2 - T_1) = K \cdot (T_1 - T_2) \quad (\text{II.10})$$

II-4 La conductivité thermique

II-4-1 Matériaux anisotropes

Certains matériaux ont une structure qui rend la conductivité thermique différente selon la direction de propagation de la chaleur.

C'est le cas des matériaux fibreux par exemple (fibre de verre, fibre de carbone). Dans ces matériaux, qu'on appelle anisotropes, le flux de chaleur aura donc une direction privilégiée. [9]

II-5 L'équation de la chaleur en conduction

II-5-1 Démonstration

Rappelons d'abord la définition de la chaleur massique. Considérons un solide de masse m . S'il reçoit une quantité de chaleur

dQ sa température s'élève de dT telle que :

$$dQ = m \cdot C dT \quad (\text{II.11})$$

avec dQ en Joule, m en Kg, dT en K et où C désigne la chaleur massique du solide en $\text{J.kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. Cette grandeur est constante pour un liquide ou un solide tandis que pour un gaz elle varie en fonction de la pression. On est alors amené à définir C_p et C_v selon que l'apport de chaleur se fait à pression ou à volume constant.

On s'intéresse ici à un solide dont on isole un volume V dont la normale \vec{n} est orientée vers l'extérieur. Faisons un bilan de l'énergie échangée par ce volume V par unité de temps. Puisque nous ne considérons que la conduction comme mode de transfert, ce bilan traduira le fait que le flux conductif qui est entré à travers la surface S n'a servi qu'à chauffer ou refroidir la masse de solide contenue dans le volume V . En prévision de nombreuses situations que l'on verra ultérieurement, envisageons également la possibilité que ce volume V contiennent des sources internes de chaleur, q en W.m^{-3} comme par exemple une résistance électrique libérant de la chaleur par effet Joule ou encore une source radioactive pour un problème de conduction thermique dans un cœur de réacteur. On écrit donc :

$$-\int_S \vec{\varphi} \cdot \vec{n} \, ds + \int_V q \, dv = \int_S \lambda \vec{\text{grad}}T \cdot \vec{n} \, ds + \int_V q \, dv = \int_V \rho C \frac{\partial T}{\partial t} \, dv \quad (\text{II.12})$$

Le signe (-) dans le calcul du flux tient au fait que l'on fait un bilan dans le sens opposé à la normale \vec{n} . Par ailleurs, la dérivée partielle de la température est due au fait que T est une

fonction de plusieurs variables : $T(x, y, z, t)$

L'utilisation du théorème d'Ostrogorski permet d'écrire :

$$\int_V \left(\operatorname{div} \left[\lambda \overrightarrow{\operatorname{grad} T} \right] + q \right) dv = \int_V \rho C \frac{\partial T}{\partial t} dv \quad (\text{II.13})$$

Cette relation étant valable quel que soit le volume V , on obtient :

$$\operatorname{div} \left(\lambda \overrightarrow{\operatorname{grad} T} \right) + q = \rho C \frac{\partial T}{\partial t} \quad (\text{II.14})$$

Plusieurs cas particuliers allègent cette équation :

Régime permanent : la température ne varie pas en fonction du temps. De ce fait $\frac{\partial T}{\partial t} = 0$ et

l'équation de la chaleur devient:

$$\operatorname{div} \left(\lambda \overrightarrow{\operatorname{grad} T} \right) + q = 0 \quad (\text{II.15})$$

II-5-2 Conditions aux limites isothermes

La température de la frontière est imposée. Elle peut dépendre du temps et même varier le long de la frontière. Le cas le plus simple est $T=T_0=C_{ts}$ sur toute la frontière. Une telle condition est expérimentalement difficile à réaliser sauf si le solide dans lequel on cherche la distribution de température est en contact avec un milieu extrêmement conducteur (cuivre par exemple) et que ce milieu est lui-même parcouru par un fluide qui le maintient à T_0 (cf. figure II.5). [10]

II.5.3 Conditions aux limites à flux constant

Une densité de flux de chaleur $\vec{\varphi}$ est imposée sur la frontière. Cette condition, de part la loi de Fourier, impose donc la valeur du gradient de température à la frontière du corps considéré $\left(\frac{\partial T}{\partial n} = -\frac{\varphi_0}{\lambda} \right)$ où \vec{n} est la normale à la frontière. La réalisation expérimentale d'un flux imposé peut se faire par exemple au moyen de résistances électriques (cf. figure II.6).

Un cas particulier de flux imposé est $\vec{\varphi}_0 = 0$: cela signifie que la paroi est isolée thermiquement (on dit aussi adiabatique) ce qui se réalise en la calfeutrant avec un matériau

isolant (laine de verre, polystyrène). Toujours de part la loi de Fourier, on en déduit :

$$\left[\frac{\partial T}{\partial n} \right]_p = 0$$

à la paroi (indice P). Ainsi les isothermes seront perpendiculaires à la frontière considérée.

[10]

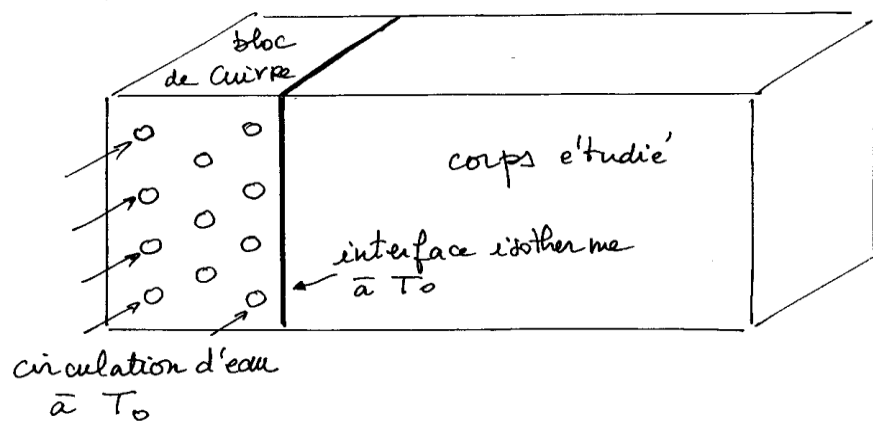


Fig.II.5 Réalisation expérimentale d'une condition aux limites isothermes à T_0 .

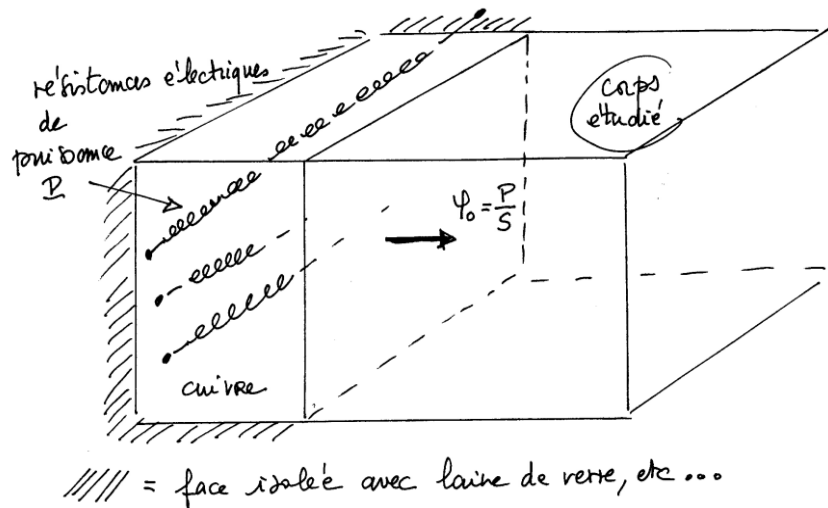


Fig.II.6 Réalisation expérimentale d'une condition de flux constant

II-5-4 Échanges convectifs sur une paroi

Lorsqu'une paroi échange de la chaleur par convection avec l'extérieur, la densité de flux ϕ qu'elle échange est proportionnelle à la différence de température entre la paroi et le milieu fluide extérieur, multipliée par un coefficient d'échange h en $\text{W.m}^{-2} \text{K}^{-1}$ qui tient compte des différentes propriétés physiques et cinématiques du fluide léchant la paroi:

$$\phi = h(T_{\text{paroi}} - T_{\text{fluide}}) \quad (\text{II.16})$$

En tout point de la frontière, ce flux ϕ étant fourni par conduction au travers du solide étudié, on en déduit le gradient de T à cette frontière : [10]

$$-\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right)_{\text{paroi}} = h(T_{\text{paroi}} - T_{\text{fluide}}) \quad (\text{II.17})$$

II-5-5 Echanges radiatifs sur une paroi

Le rayonnement d'une paroi peut être un mode d'échange à prendre en compte, surtout si sa température est élevée (supérieure à 100 degrés environ). Comme on le verra, le flux qu'une paroi à la température T_p échange par rayonnement avec le milieu externe à la température T_{ext} vaut

: $\sigma(T_p^4 - T_{\text{ext}}^4)$ où σ est la constante de Stefan-Boltzmann. Dans un tel cas, la condition aux limites à la frontière deviendra donc : [10]

$$-\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right)_{\text{paroi}} = \sigma(T_{\text{paroi}}^4 - T_{\text{ext}}^4) \quad (\text{II.18})$$

II-5-6 Condition de passage entre 2 solides

Si le problème étudié comporte deux milieux (ou plus) on devra écrire une condition aux limites à chaque frontière entre deux solides en contact. La conservation de la chaleur de part et d'autre de la frontière impose :

$$\lambda_1 \left(\frac{\partial T_1}{\partial n} \right)_{\text{paroi}} = \lambda_2 \left(\frac{\partial T_2}{\partial n} \right)_{\text{paroi}} \quad (\text{II.19})$$

où λ_1 et λ_2 sont les conductivités thermiques des solides 1 et 2 et T_1 et T_2 sont les distributions de température dans ces solides. [9]

II-5-7 Conductivité et diffusivité thermique

Considérons la résolution d'un problème de conduction **permanent** sans sources ($q = 0$) dans un milieu homogène. On résout donc :

$$\nabla^2 T = 0 \quad (\text{II.20})$$

Si les conditions aux limites sont isothermes, la conductivité thermique λ du solide n'intervient pas dans la solution. Elle n'interviendra que si celles-ci prescrivent le flux qui, on l'a vu, impose la valeur de $-\lambda \frac{\partial T}{\partial n}$ à la frontière. Considérons maintenant un problème non-permanent de conduction (toujours avec $q = 0$). On résoud donc :

$$a \nabla^2 T = \frac{\partial T}{\partial t} \quad (\text{II.21})$$

Où $a = \frac{\lambda}{\rho c_p}$ (en $m^2 \cdot s^{-1}$) désigne la diffusivité thermique du solide. [9]

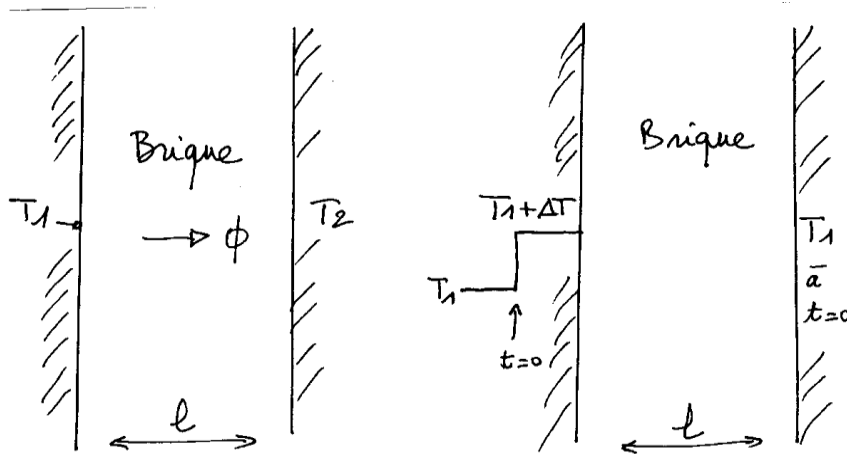


Fig.II.7 Brique en régime stationnaire (a) et instationnaire (b)

II-5-7-1 Equation de la chaleur en régime permanent

En régime permanent et dans un matériau isotrope, l'équation de la chaleur est une équation de Poisson :

$$\nabla^2 T = -\frac{q}{\lambda} \quad (\text{II.22})$$

L'expression développée varie avec le système de coordonnées :

- Cartésiennes :

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = -\frac{q}{\lambda} \quad (\text{II.23})$$

- Cylindriques :

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = -\frac{q}{\lambda} \quad (\text{II.24})$$

- Sphériques :

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} = -\frac{q}{\lambda} \quad (\text{II.25})$$

Les problèmes 1D peuvent souvent se résoudre analytiquement. Les problèmes 3D

nécessitent souvent l'emploi de méthodes numériques traitées par ordinateur. En 1D, les équations ci-dessus deviennent : [11]

En cartésien :

$$\frac{d^2T}{dx^2} = -\frac{q}{\lambda} \quad (\text{II.26})$$

En cylindrique :

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dT}{dr} \right) = -\frac{q}{\lambda} \quad (\text{II.27})$$

En sphérique :

$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{dT}{dr} \right) = -\frac{q}{\lambda} \quad (\text{II.28})$$

II-6 Exemples de résolution de l'équation de la chaleur en conduction

Ces exemples sont directement tirés du cours de transferts thermiques de l'IUT génie thermique et énergie de Grenoble.

II-6-1 Cas d'un mur plan

Des température T_1 et T_2 sont imposées aux bornes d'un mur d'épaisseur e et de conductivité thermique λ (cf. figure II.8). L'équation de la chaleur 1D cartésienne : $\frac{d^2T}{dx^2} = 0$ admet la solution $T = Ax+B$. Les conditions aux limites en $x = 0$ et en $x = e$ permettent d'éliminer A et B pour donner :

$$T = T_1 - (T_1 - T_2) \frac{x}{e} \quad (\text{II.29})$$

La distribution de température est donc linéaire et les isothermes sont régulièrement distribuées de $x = 0$ à $x = e$. La densité de flux en tout point vaut :

$$\varphi = -\lambda \frac{dT}{dx} = \lambda \frac{T_1 - T_2}{e} \quad (\text{II.30})$$

et est bien positive si $T_1 > T_2$ (flux allant du chaud vers le froid). Le flux Φ traversant une surface S vaut donc $\lambda \frac{T_1 - T_2}{e} S$ se sorte que la résistance thermique R définie par $T_1 - T_2 = R\Phi$ vaut:

$$R = \frac{1}{\lambda} \frac{e}{S} \quad (\text{II.31})$$

Notons enfin que le flux de chaleur Φ est le même quelle que soit l'abscisse à laquelle on le calcule (de 0 jusqu'à e). Ceci est garanti par la pente constante de la distribution de température.

[10]

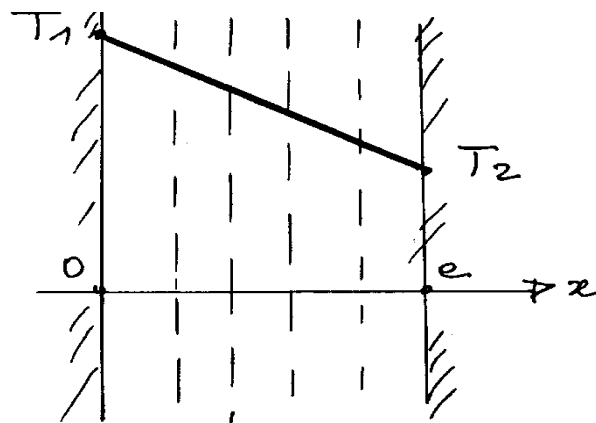


Fig.II.8 Mur plan

II.6.2 Association de murs en série ou en parallèle

Lorsque plusieurs murs sont en série, la résistance totale, R_t du tube de flux ainsi formé vaut :

$$R_t = \sum_i R_i = \sum_i \frac{1}{\lambda_i} \frac{e_i}{S_i} \quad (\text{II.32})$$

Leur mise en parallèle amène à l'expression suivante de R_t , analogue de celle obtenue en électricité

$$\frac{1}{R_t} = \sum_i \frac{1}{R_i} = \sum_i \frac{\lambda_i S_i}{e_i} \quad (\text{II.33})$$

Cette méthode s'applique à des résistances de sections différentes à condition que l'on raisonne sur un tube de flux. C'est le cas par exemple sur la figure II.9 sur laquelle les frontières latérales des 5 résistances sont isolées. [9]

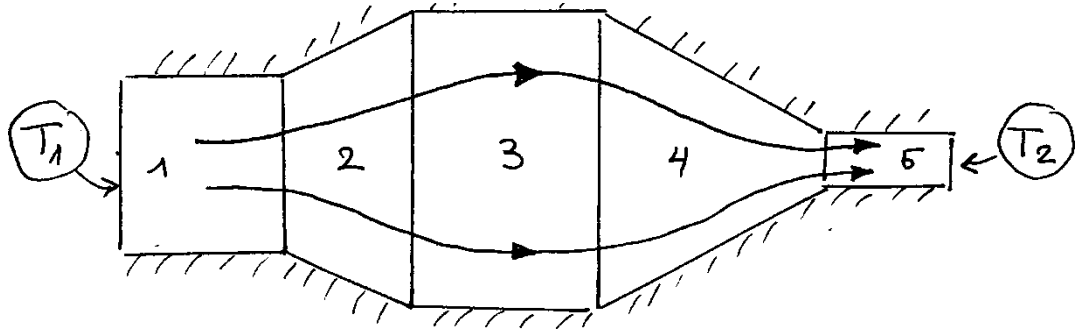


Fig.II.9 Mise en série de résistances thermiques.

II-6-3 Mur avec sources internes

C'est le cas d'une paroi ou d'un plancher chauffé intérieurement par des résistances électriques (cf. figure II.10).

II-6-3-1 Températures d'extrémité sidentiques

Appelons T_0 la température aux extrémités de la paroi et q (W.m^{-3}) la densité volumique des sources. L'équation de la chaleur s'écrit :

$$\frac{d^2T}{dx^2} = -\frac{q}{\lambda} \quad (\text{II.34})$$

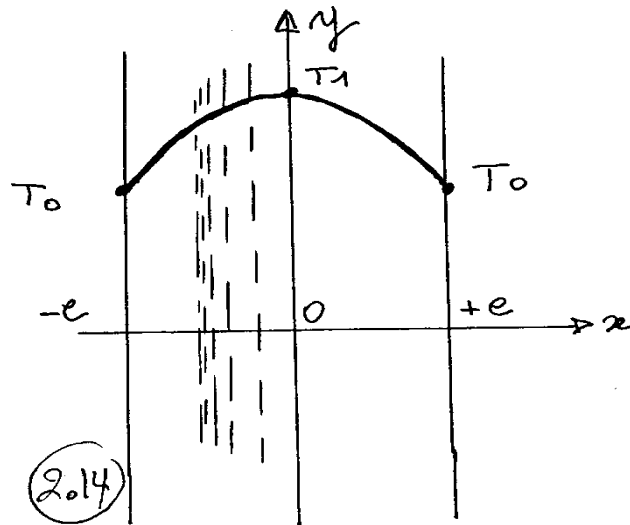


Fig.II.10 Mur avec sources internes

Dont la solution est une parabole :

$$T = -\frac{q}{\lambda} \frac{x^2}{2} + Ax + B \quad (\text{II.35})$$

Les conditions aux limites en $x = +e$ et $x = -e$ donnent finalement :

$$T = T_0 + \frac{q}{2\lambda} (e^2 - x^2) \quad (\text{II.36})$$

L'écart de température au centre du mur vaut donc : $\frac{qe^2}{2\lambda}$. La densité de flux vaut : $\phi = qx$

Elle est nulle au centre par symétrie et maximum en $x = \pm e$. Les isothermes sont donc plus serrées à cet endroit. Le flux $\phi = qe$ en $x = e$ est tel qu'il évacue l'ensemble des sources situées entre $x = 0$ et $x = e$. [10]

II-6-3-2 Températures d'extrémités différentes

Appelons T_1 et T_2 les températures en $x = -e$ et en $x = e$. La solution générale est inchangée et seules les conditions aux limites changent. On en déduit la solution :

$$T = \frac{q}{2\lambda} (e^2 - x^2) - \frac{T_1 - T_2}{2e} x + \frac{T_1 + T_2}{2} \quad (\text{II.37}) [10]$$

II-7 Mur avec conditions de convection aux parois

La température au loin de l'air qui entoure le mur vaut T_1 à gauche et T_2 à droite (cf. figure II.11).

Appelons h le coefficient d'échange aux parois. La solution générale de l'équation de la chaleur est inchangée : $T = Ax + B$. Les conditions aux limites se traduisent par :

$$\text{en } x=0 : \varphi = h(T_1 - T_{p1}) = -\lambda A$$

$$\text{en } x=e : \varphi = h(T_{p2} - T_2) = -\lambda A$$

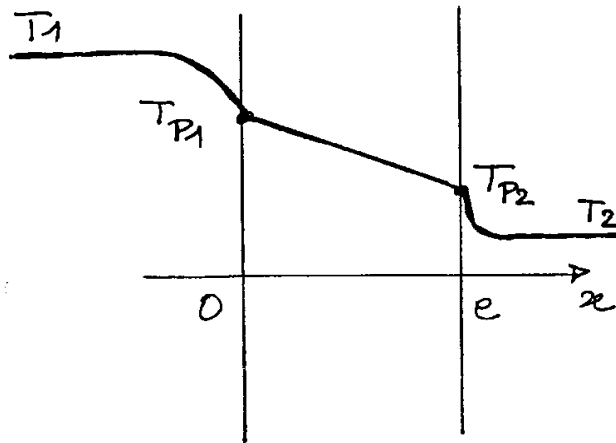


Fig.II.11 Mur avec conditions de convection aux extrémités.

On peut éliminer A et B de ces deux équations et obtenir la solution finale. On peut aussi utiliser la notion de résistance thermique (cf. figure II.12). La résistance convective R_{cv} est telle que $T_1 - T_{p1} = R_{cv}\Phi$ mais $\Phi = hS(T_1 - T_{p1})$ d'où :

$$R_{cv} = \frac{1}{hS}$$

tandis que :

$$R_{cd} = \frac{1}{\lambda S}$$



Fig.II.12 Résistances thermiques équivalente dans le cas d'un mur avec convection.

La résistance totale entre T_1 et T_2 vaut donc :

$$R_t = 2R_{cv} + R_{cd} = \frac{2}{hS} + \frac{e}{\lambda S} \quad (\text{II. 38})$$

d'où le flux $\Phi = \frac{T_1 - T_2}{R_t}$ qui circulera à travers le mur. On en déduit les températures de paroi:

$$T_{p1} = T_1 - \frac{T_1 - T_2}{2 + \frac{eh}{\lambda}} \quad (\text{II. 39})$$

$$T_{p2} = T_2 + \frac{T_1 - T_2}{2 + \frac{eh}{\lambda}} \quad (\text{II. 40})$$

à l'intérieur du mur la solution linéaire s'écrit : [10]

$$T = T_{p1} - (T_{p1} - T_{p2}) \frac{x}{e} \quad (\text{II. 41})$$

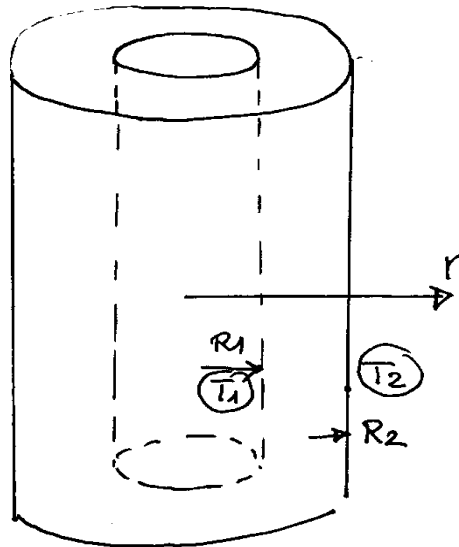


Fig.II.13 Conduction dans une coque cylindrique

II.7.1 Conduction dans une coque cylindrique

Considérons une coque cylindrique limitée par les rayons R_1 et R_2 de températures T_1 et T_2 , suffisamment longue pour que l'on puisse considérer le transfert de chaleur uniquement radial (cf. figure II.13). L'équation de la chaleur s'écrit :

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dT}{dr} \right) = 0 \quad (\text{II.42})$$

d'où : $r \frac{dT}{dr} = A$ ce qui donne :

$$T = A \ln r + B \quad (\text{II.43})$$

Les conditions aux limites fournissent les constantes A et B et on en déduit la solution finale:

$$\frac{T - T_1}{T_2 - T_1} = \frac{\ln \left(\frac{r}{R_1} \right)}{\ln \left(\frac{R_2}{R_1} \right)} \quad (\text{II.44})$$

On en déduit le flux à travers une surface cylindrique quelconque de rayon r et de hauteur L située entre R_1 et R_2 :

$$\dot{Q} = 2\pi r L \varphi = -2\pi L \lambda \frac{dT}{dr} = -2\pi L \lambda \frac{T_2 - T_1}{\ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)} \quad (\text{II.45})$$

Ce qui fournit la valeur de la résistance thermique de la coque :

$$R_{\text{cyl}} = \frac{\ln(R_2 - R_1)}{2\pi L \lambda} \quad (\text{II.46})$$

On pourra vérifier que si R_2 et R_1 sont très proches, le problème se comporte comme un mur (disparition de l'effet de courbure) et R_{cyl} tend vers $\frac{e}{\lambda S}$. [10]

II.7.2 Conduction dans une coque sphérique

L'équation de T en coordonnées sphériques s'écrit :

$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{dT}{dr} \right) = 0 \quad (\text{II.47})$$

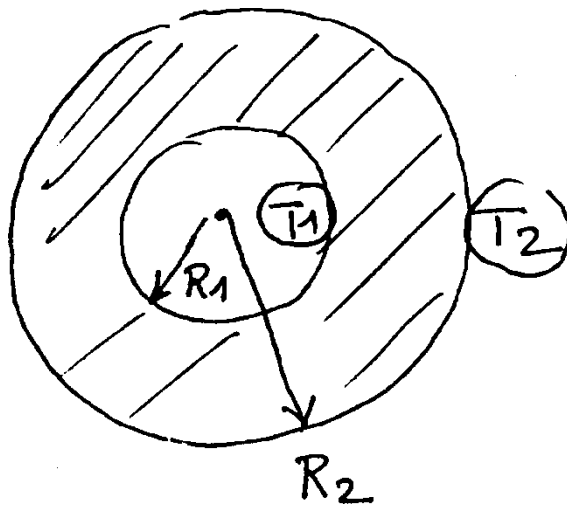


Fig.II.14 Conduction dans une coque sphérique.

d'où : $r^2 \frac{dT}{dr} = A$ et $T = -\frac{A}{r} + B$. Les conditions aux limites fixent A et B de sorte que (cf.

figureII.14):

$$\frac{T - T_1}{T_2 - T_2} = \frac{\frac{1}{r} - \frac{1}{R_1}}{\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_1}} \quad (\text{II.48})$$

Le flux de chaleur vaut alors :

$$\phi = 4\pi r^2 \varphi = -4\pi r^2 \lambda \frac{dT}{dr} = 4\pi \lambda \frac{T_1 - T_2}{\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}} \quad (\text{II.49})$$

et est bien positif si $T_1 > T_2$. La résistance thermique d'une coque vaut ainsi : [10]

$$R_{\text{sph}} = \frac{\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}}{4\pi \lambda} \quad (\text{II.50})$$

II.7.3 Remarques finales sur la conduction

La plupart des exemples traités dans le chapitre précédent supposent le corps étudié solide. Il faut garder à l'esprit le fait que la conduction existe aussi dans les fluides (liquides ou gaz) mais que, en général, ceux-ci restent rarement immobiles et, de ce fait, transportent en se déplaçant un flux de chaleur infiniment plus grand que celui qui circule par conduction seule. Ce mode de transport est la Convection et sera vu ultérieurement. [10]

II.7.4 Analogie avec la diffusion de masse

Nous venons de voir qu'un flux de chaleur est proportionnel à la conductivité thermique et au gradient de température. Considérons un liquide (eau par exemple) contenant une distribution de sel inhomogène. Du fait des différences de concentration C de sel dans le liquide, une migration des molécules de sel s'effectuera, elle aussi dirigée dans le sens des gradients négatifs de C c'est à dire du plus concentré vers le moins concentré. Un débit massique q_m de sel (en kg.s^{-1}) s'en suivra dont la loi de Fick fixe la densité :

$$\vec{\varphi}_m = -D \overrightarrow{\text{grad}C} \quad (\text{II.51})$$

où $\vec{\varphi}_m$ représente le vecteur de densité de flux massique (en $\text{kg.s}^{-1}\text{m}^{-2}$), D la diffusivité de masse ($\text{m}^2.\text{s}^{-1}$) et C la concentration de soluté (sel) dans le solvant (eau), en kg.m^{-3} .

La divergence de la loi de Fick fournit une équation différentielle très semblable à celle de

la chaleur :

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \text{div}(\overrightarrow{D \text{ grad} C}) \quad (\text{II.52})$$

où le second membre se résume à $D\nabla^2 C$ si D est constant. Cette équation est l'analogie de $\frac{\partial T}{\partial t} = a\nabla^2 T$ pour la conduction de la chaleur sans sources. [12]

II.7.5 Résolution numérique d'un problème de conduction

La résolution d'un problème industriel de conduction nécessite souvent d'avoir recours à un outil numérique. Il existe un grand nombre de logiciels de conduction de la chaleur fonctionnant sur PC ou sur stations de travail. [12]

II.8 Loi fondamentale de la convection (loi de I. Newton)

La loi fondamentale de la convection est la loi d'**Isaac Newton (1643-1727)**, traduite par la relation expérimentale de flux de chaleur échangé par convection entre un fluide et une paroi solide.

$$\Phi = h \cdot s \cdot (T_{\text{chaud}} - T_{\text{froid}}) \quad (\text{II.53})$$

$$h = \frac{K_{\text{fluide}}}{\delta} \quad (\text{II.54})$$

δ : représente l'épaisseur d'un film mince du fluide adhérent à la paroi solide K fluide

h : représente le coefficient du transfert de chaleur par convection [W/m².K] ou [kcal/h.m².C] [10]

II.8.1 Lois du rayonnement

Le rayonnement est un mode de transfert particulièrement important dans de nombreuses situations industrielles à hautes températures (fours par exemple) mais aussi géophysiques (refroidissement nocturne de la Terre).

Le rayonnement est à la base de nombreuses méthodes de mesures de température (caméra infra-rouge, pyromètre à filament) qui sont non-intrusives et permettent d'opérer à distance, d'où l'importance d'étudier soigneusement le rayonnement.

Le rayonnement thermique est de nature électromagnétique en raison de l'agitation de la matière sous l'effet de la température. Une onde électromagnétique consiste en un champ électrique \vec{E} , un champ magnétique \vec{B} et un vecteur d'onde \vec{k} , tous trois perpendiculaires. L'onde se propage dans la direction du vecteur d'onde avec une vitesse c qui varie selon le milieu qu'elle traverse. Cette vitesse vaut $c = \frac{c_0}{n}$ où c_0 est la vitesse de la lumière dans le vide et n l'indice du milieu. La fréquence d'une onde électromagnétique ne varie pas avec le milieu qu'elle traverse. Elle est liée à c par la relation :

$$\lambda = \frac{c}{\nu} = cT \quad (\text{II.55})$$

où $\nu = 1/T$ est la fréquence de l'onde électromagnétique. On voit donc que la longueur d'onde sera fonction du milieu traversé.

Une onde transporte avec elle de l'énergie. Lorsqu'elle est émise par un corps radiant, celui-ci perd donc un certain flux d'énergie Φ (Watt). De même, un corps frappé par une onde électromagnétique reçoit de l'énergie. La distribution énergétique d'un rayonnement polychromatique (large gamme de λ) varie avec λ (figure II.15).

On définit ainsi le flux monochromatique Φ_λ (W.m^{-1}) qui caractérise la contribution de chaque longueur d'onde. On a, bien sûr :

$$\Phi = \int_0^\lambda \Phi_\lambda d\lambda \quad (\text{II.56})$$

Seules les longueurs d'onde comprises entre $0.4\mu\text{m}$ et $0.8\mu\text{m}$ sont visibles par l'œil. La figure 3.2 illustre la variété de rayonnements existants.

Les rayons lumineux interagissent avec la matière de sorte que si certains corps la laissent passer (corps transparents) certains autres l'absorbent en partie ou en totalité (corps opaques). Pour un flux incident Φ_i , on définit les quantités suivantes (cf. figure II.17) :

- Flux réfléchi Φ_r
- Flux absorbé Φ_a

- Flux transmis Φ_t on appelle :
- Réflectivité: $r = \frac{\phi_r}{\phi_i}$
- Absorptivité: $a = \frac{\phi_a}{\phi_i}$
- Transivité : $t = \frac{\phi_t}{\phi_i}$

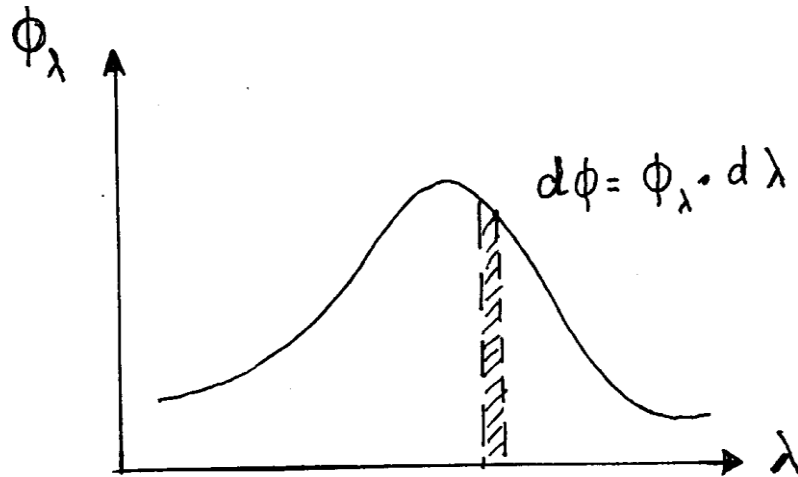


Fig.II.15 Spectre d'un rayonnement électromagnétique.

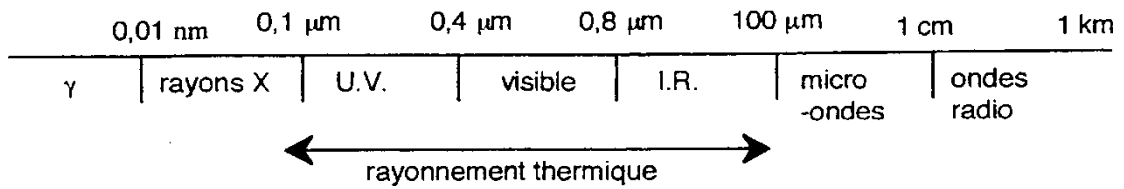


Fig.II.16 Divers rayonnements électromagnétiques classes selon leur longueur d'onde.

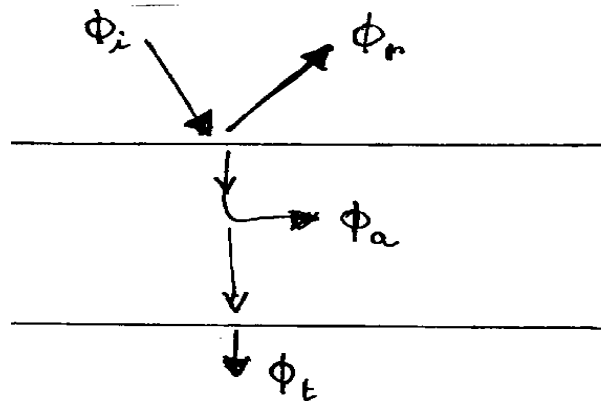


Fig.II.17 Définition des flux réfléchis, absorbés, transmis

La conservation de l'énergie impose :

$$r + a + t = 1 \quad (\text{II.57})$$

Ces grandeurs varient selon la valeur de λ . Ainsi le verre laisse passer les UV et est opaque aux Infra-rouges. On doit donc définir $r\lambda$, $a\lambda$, $t\lambda$ qui sont les réflectivités, absorptivités et transmittivités monochromatiques. Elles dépendent aussi de la direction d'émission. [10]

II.8.2 La loi de Stefan-Boltzmann

Définissons d'abord l'émittance du corps noir, M_0 , qui est la puissance totale émise par une unité de surface, en intégrant sur toutes les longueurs d'onde. La loi de Stefan-Boltzmann lie cette grandeur à la température du corps noir : [10]

$$M_0 = \sigma T^4 \quad (\text{II.58})$$

où M_0 est en W.m^{-2} , T en Kelvin, et σ est la constante universelle de Stefan-Boltzmann :

$$\sigma = 5.670 \cdot 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4} \quad (\text{II.59})$$

II.8.3 La loi de Planck

Cette loi fixe la contribution respective de chaque longueur d'onde dans l'émission du corps noir. Elle s'écrit :

$$M_{\lambda}^0 = \frac{C_1}{\lambda^5 \left(\frac{C_2}{e^{\lambda T}} - 1 \right)} \quad (\text{II.60})$$

avec : $C_1 = 3.74110^{-16} \text{W.m}^2$, $C_2 = 0.0143 \text{m.K}$ et où M_{λ}^0 (en W.m^{-3}) désigne l'émission monochromatique. L'intégration de M_{λ}^0 donne évidemment M^0 :

$$\int_0^{\infty} M_{\lambda}^0 d\lambda = \sigma T^4 = M^0 \quad (\text{II.61})$$

Les figures 3.5 montrent l'allure de M_{λ}^0 en fonction de T pour diverses températures. Elles passent toutes par un maximum. [10]

II.9 Loi de Wien

II.9.1 Énoncé

Cette loi fixe le lieu de ces maxima. En annulant $\frac{\partial M_{\lambda}^0}{\partial \lambda}$ on trouve :

$$\lambda_{\max} T = 2898 \mu\text{m.K} \quad (\text{II.62})$$

où λ_{\max} est la longueur d'onde correspondant au maximum d'énergie émise à la température T . Le déplacement de λ_{\max} vers les courtes longueurs d'onde quand T augmente explique que, lorsqu'un corps chauffe, il commence d'abord par émettre dans l'infrarouge et n'est donc pas visible, puis son spectre vient empiéter sur la zone rouge du spectre visible, puis couvre tout le visible et devient alors blanc. D'où l'expression "chauffer au rouge" ou "chauffer à blanc".

Il n'y a quasiment aucune zone commune entre le spectre du rayonnement solaire ($T \approx 5700\text{K}$) et celui d'un corps à température ambiante (300K). Le soleil émet principalement dans le visible et dans l'UV tandis qu'un corps à l'ambiante n'émet que dans l'infrarouge. Cette propriété est exploitée dans les serres ou les capteurs solaires.

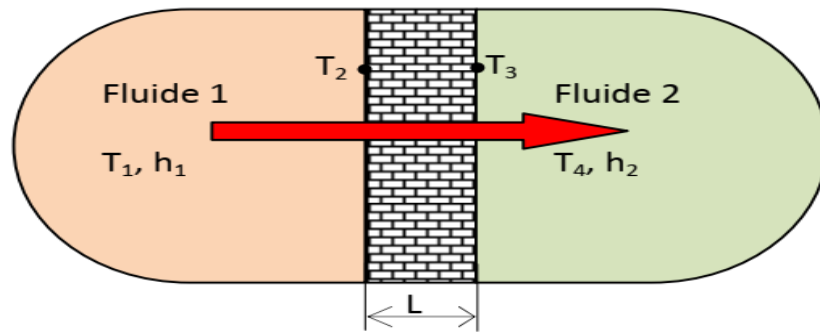


Fig.II.18 Transfert de chaleur entre deux fluides séparés par un mur simple

Analogiquement à la théorie électrique et en comparant les lois de Fourier et celle de Newton du côté thermique à la loi d'Ohm du côté électrique, on peut considérer que les termes: RCV1, RCD et RCV2 représentent dans ce cas, les résistances thermiques.

$$T_2 - T_3 = \left(\frac{L}{K \cdot S} \right) \cdot \Phi: \text{loi de Fourier}$$

$$T_1 - T_2 = \left(\frac{1}{h_1 \cdot S} \right) \cdot \Phi: \text{loi de Newton}$$

$$U_1 - U_2 = R \cdot I: \text{loi d'Ohm}$$

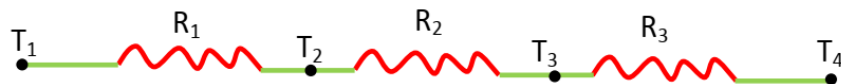


Schéma électrique équivalent

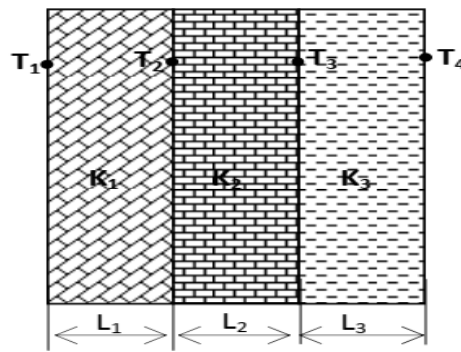


Fig.II.19 Mur Composé

La conservation du flux thermique implique les égalités suivantes :

$$\begin{aligned} \Phi &= K_1 \cdot \frac{S}{L_1} \cdot (T_1 - T_2) = K_2 \cdot \frac{S}{L_2} \cdot (T_2 - T_3) = K_3 \cdot \frac{S}{L_3} \cdot (T_3 - T_4) = \frac{(T_1 - T_2)}{\frac{L_1}{K_1 \cdot S}} = \frac{(T_2 - T_3)}{\frac{L_2}{K_2 \cdot S}} \\ &= \frac{(T_3 - T_4)}{\frac{L_3}{K_3 \cdot S}} = \frac{(T_1 - T_4)}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{(T_1 - T_4)}{\sum_1^3 R_i} \end{aligned} \quad (\text{II.63})$$

Le mur composé se comporte donc, comme un mur simple de résistance thermique équivalente :

$$R_e = \sum_{i=1}^n R_i \quad (\text{II.64})$$

II.9.2 Les échangeurs thermiques, un procédé industriel de la mécanique des fluides

Les échangeurs thermiques sont des éléments essentiels du domaine du chauffage et de la climatisation. Un échangeur thermique permet le transfert de chaleur entre deux fluides au travers d'une paroi. Le matériau qui compose l'échangeur thermique doit alors être le plus conducteur possible afin de limiter les pertes thermiques et favoriser l'échange.

Pour que l'échange soit possible, il doit y avoir différence de température. Le delta de température (dT) est généralement exprimé en Kelvin (K) ou en degrés Celsius ($^{\circ}\text{C}$). De ce fait, au niveau de l'échangeur, le premier fluide entre chaud et ressort refroidi, tandis que le second fluide entre froid et ressort plus chaud.

Il existe de nombreux types d'échangeurs thermiques, à air ou à eau. On retrouve également le fluide caloporteur, chargé de transporter la chaleur entre deux ou plusieurs sources de températures. Ces fluides interviennent dans les échangeurs de chaleur propres à l'habitat des particuliers, avec le radiateur électrique à inertie par exemple. Le fluide caloporteur intervient également dans tout type de procédé industriel. Il sert à maintenir en température des bacs de stockage ou à chauffer des équipements notamment. [11]

Conclusion

Le transfert de chaleur est une science qui contient plusieurs concepts pratiques de base utilisés dans de nombreuses applications industriels. Le transfert de chaleur peut s'effectuer au moyen de trois mécanismes différents, la conduction, la convection et le rayonnement. Les connaissances de base dans ce domaine, sont donc indispensables pour comprendre et maîtriser l'utilisation pratique de ces phénomènes.

Le transfert de chaleur peut être défini comme étant la transmission de l'énergie d'une région à une autre une fois la différence de température entre elles établie. Il est régi par une combinaison de lois physiques et de relations empiriques déduites de l'expérimentation. Dans la littérature relative à cette discipline, on reconnaît généralement trois modes distincts de transmission de la chaleur : la conduction, la convection et le rayonnement.

Chapitre III
Modélisation
électrothermique
d'un disjoncteur

III.1 Introduction

L'approche nodale, à l'origine mise au point dans les années 1950 pour la modélisation des réseaux électriques, puis rapidement adaptée à la modélisation thermique, a été particulièrement exploitée dans les années 1980, époque où les problématiques thermiques commençaient à prendre une grande importance mais où la puissance des calculateurs limitait les possibilités de modélisation. En effet, la simplicité mathématique des équations mises en jeu réduit considérablement les temps de calcul nécessaires.

III.2 Méthode thermique nodale

MTN utilise l'analogie entre les grandeurs électriques et thermiques, comme indiqué dans le tableau 1 [2–6, 9], où le flux de chaleur et la température correspondent respectivement au flux de courant et à la tension. Semblable à la Loi d'Ohm pour les champs de diffusion électrique, la relation suivante résultats entre la différence de température $\Delta\theta$, la résistance thermique R et le taux de chaleur transférée P sont présentés par la formule (III.2) .

$$\Delta\theta = P \cdot R \quad (\text{III. 1})$$

Les réseaux thermiques sont composés de quatre éléments de base, qui se rapportent directement aux éléments du circuit électrique correspondants, avec signification physique différente:

Source de courant CC - liée aux pertes de puissance dans le matériau (chaleur ,source). Le montant des pertes est lié à l'ampleur ducourant, qui traverse un conducteur, ainsi que géométrique dimensions et propriétés du matériau. Le phénomène est décrit au moyen de l'équation suivante:

$$P=I^2 \frac{\rho_{20}L}{S} (1 + \alpha_{20}(\theta - 20)) \quad (\text{III. 2})$$

Où I est le courant nominal [A]; ρ_{20} est la résistivité du matériau à 20 ° C [Ωm]; L est la longueur du matériau [m]; S est la section transversale dematériau [m^2]; α_{20} est le coefficient de température [K^{-1}]; et θ est le température [° C]. Source de tension continue - responsable d'une température ambiante.

✓ **Capacité:** capacité du matériau à stocker la chaleur. La valeur de ce composant détermine le temps après que les conditions d'équilibre se produisent, ainsi que le taux de changement de température (en cas de modèle dynamique). Il est lié aux paramètres physiques du matériau utilisé, formule (III.3).

Quantité	Système électrique	Système thermique
Potentiel	U, V	T, K
Flux	I, A	AQ, W
Résistance	R, Ω	R, K / W
Conductance	1 / R, S	G, W / K
Capacité	C, F	C, J / K
Loi d'Ohm	I = U / R	Q = T · G

Tableau III. 1 Analogies thermo-électriques [2-6, 9]

$$C = c_s m \quad (\text{III.3})$$

où c_s est la capacité thermique spécifique [J / kg K] et m est la masse de l'élément [kg].

✓ **Résistance:** capacité du matériau à empêcher le flux de chaleur. Il y a quatre mécanismes de transformation de l'énergie électrique en chaleur (dissipée sur les résistances thermiques), résistance des conducteurs, hystérésis magnétique des matériaux en champ magnétique, courants de Foucault, certains phénomènes dans les matériaux diélectriques. Trois modes de transfert de chaleur dans les appareils électriques: conduction, rayonnement et convection sont également représentés par des résistances «thermiques».

III.2.1 Principe de la modélisation nodale

Le principe général de l'approche nodale repose sur deux aspects principaux :

III.2.1.1 Décomposition nodale

Les parties solides et fluides du système sont décomposés respectivement en un nombre n_s et n_f d'éléments volumiques de volume V_i , auxquels on attribue une capacité thermique $C_i = \rho_i \cdot c_p \cdot V_i$. Les éléments sont considérés isothermes, à température T_i (température moyenne de l'élément de volume). Les formes des volumes sont parfois complexes mais des simplifications géométriques peuvent être introduites (hypothèses de formes purement cylindriques ou de pièces à symétrie de révolution). Les nœuds sont définis au barycentre des volumes. Chaque élément doit présenter une uniformité du point de vue des propriétés physiques (ρ , c_p , λ et ε). En pratique, le respect de ces contraintes peut être satisfait par une décomposition adaptée.

III.2.1.2 Création du réseau de conductances

Il s'agit d'établir les interactions thermiques entre les nœuds précédemment définis. L'analogie établie entre les grandeurs électriques et les grandeurs thermiques permet de définir la notion de conductance thermique. Ainsi, le flux de chaleur Φ_{ij} échangé entre les nœuds i et j peut être représenté par le produit d'une conductance thermique G_{ij} et de la différence de température entre les deux nœuds:

$$\Phi_{ij} = G_{ij} (T_j - T_i) \quad (\text{III.4})$$

Par analogie avec la loi de Kirchhoff, le bilan des flux au nœud i s'écrit donc, pour n nœuds adjacents:

$$c_i \frac{dT_i}{dt} = \sum_{j=1}^n G_{ij} (T_j - T_i) + Q_i \quad (\text{III.5})$$

où Q_i est une source de chaleur injectée au nœud i . Pour l'ensemble des nœuds n du système ($n = n_s + n_f$), on obtient un système de n équations différentielles. Ce système est mis sous la forme matricielle suivante:

$$C \cdot T = A \cdot T + B \quad \text{avec} \quad A_{ij} = G_{ij} \quad \text{et} \quad A_{ij} = \sum_{j=1}^n G_{ij} \quad (\text{III.6})$$

où C est la matrice diagonale des capacités thermiques. A est la matrice de conductances. B est un vecteur comprenant toutes les grandeurs ne pouvant être intégrées à la matrice A .

L'expression des conductances dépend du type d'échange mis en jeu. Roye et al introduisent notamment, dans des modèles de conduction plus sophistiqués, basés sur l'équation de diffusion de la chaleur uni-dimensionnelle, en considérant les variations temporelles de températures indépendantes des variations en espace. Ces modèles sont donc, en quelque sorte, plus précis au sens mathématique. Cependant, ils ne sont pas utilisés dans le cadre de ces travaux.

Du fait des hautes températures présentes dans le système ($> 500^{\circ}\text{C}$), le modèle doit prendre en compte deux types de non-linéarités : - la dépendance des propriétés thermophysiques à la température. - Les échanges par rayonnement. Une méthode de résolution itérative permettra de prendre en compte la non-linéarité des propriétés thermophysiques. Il est tout à fait possible de définir une expression de conductance radiative entre deux surfaces. Toutefois, pour des géométries complexes, les échanges ont lieu entre plusieurs surfaces, de ce fait, les multi-réflexions ne sont pas négligeables. Ainsi, un réseau de conductances important est nécessaire, ce qui complique encore la création de la matrice A. Par conséquent, on adoptera une méthode basée sur un couplage entre la méthode des radiosités et la méthode nodale lors de la résolution.

III.2.2 Principe de la modélisation par MTN

La modélisation par réseau thermique nodal consiste en la modélisation d'un problème thermique par un circuit électrique équivalent en exploitant l'analogie existante entre les grandeurs thermique et électrique. Cette analogie permet, d'une part, d'utiliser les notions bien connues des circuits électriques pour la modélisation des problèmes thermiques et les lois de bases du Génie Electriques telles que les lois de Kirchhoff pour les résoudre et, d'autre part, de pouvoir utiliser des outils informatiques développés pour les simulations dédiées aux circuits électriques.

L'établissement d'un modèle MTN peut se décomposer en quatre étapes :

- Premièrement, le composant est découpé en blocs élémentaires.
- Deuxièmement, les éléments du modèle relatifs à chaque élément sont calculés.
- Troisièmement, le problème est mis en équation.
- Enfin, le problème est résolu en tenant compte des différentes conditions du système.

Avant de détailler ces différentes étapes de conception d'un modèle RTN, il convient de définir les différents types possibles, à savoir modèle comportemental ou modèle structurel.

III.2.3 Type du modèle thermique

Le découpage d'un composant en vue de sa modélisation thermique nodale peut se faire de plusieurs manières, selon l'objectif recherché de la modélisation ou encore la précision voulue. Ce découpage peut être plutôt global, on parle alors de modèle comportemental ou plus fortement lié à la géométrie du composant, on parle alors de modèle structurel.

III.2.3.1 Modèle thermique comportemental

Ce modèle représente le composant d'une manière globale. Il peut se référer aux différentes parties du composant (exemple : noyaux magnétique, enroulements...) pour établir les éléments du modèle thermique, avec finalement peu de lien entre le modèle et la géométrie du composant. En général ce type de modèle présente un nombre de noeuds très réduit et ne donne qu'un nombre limité de valeurs de température pour une ou plusieurs parties du composant. Un exemple typique de ce genre de modèle est la représentation du transformateur par une résistance thermique unique (cf. chapitre 3). La Figure III-1 présente un autre exemple de modèle comportemental pour un composant d'une inductance, dans lequel l'enroulement et le noyau magnétique sont sources de pertes tandis que leurs températures sont reliées entre elles et vis-à-vis de la température ambiante par seulement trois résistances thermiques. En général pour ce type de modèle, les résistances thermiques sont identifiées à partir des essais expérimentaux.

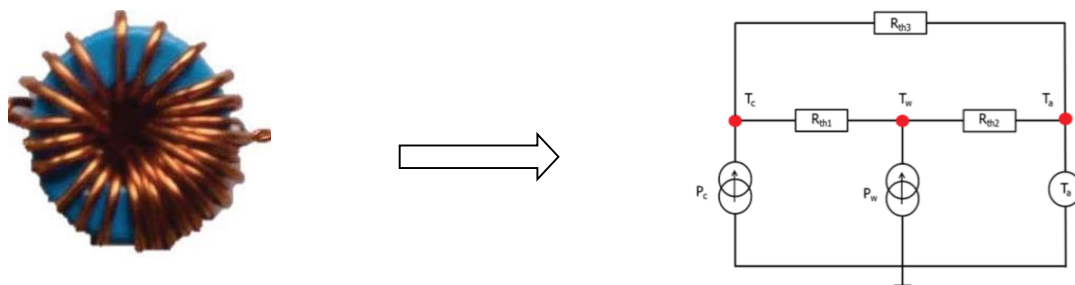


Fig.III.1 Exemple de réseau thermique comportemental pour une inductance de convertisseur DC/DC

III.2.3.2 Modèle thermique structurel (géométrique)

Pour un modèle dit « structurel », le découpage est basé sur la géométrie du composant pour définir ses différents éléments. Ainsi, la correspondance entre le réseau thermique et la géométrie du composant est identifiée facilement. Ce type de modèle présente généralement un

grand nombre d'éléments, permettant d'obtenir des valeurs de températures en de nombreux points du composant. Le découpage du composant en éléments de géométries simples permet d'avoir recours à des expressions assez simples pour le calcul des différentes résistances thermiques correspondant à chacun de ces éléments.

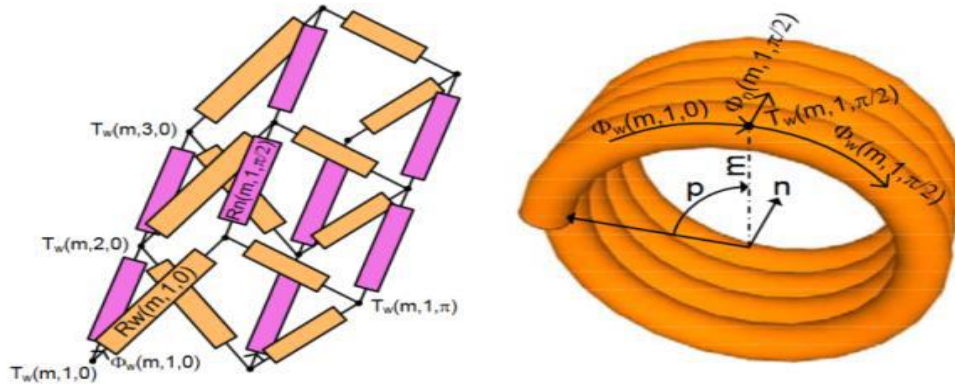


Fig.III.2: Exemple de réseau thermique structurel pour une couche du bobinage d'un composant magnétique

III.3 Conduction thermique par méthode nodale

Poussée par la différence de température (la chaleur s'écoule du plus vers le moins de particules chauffées dans un corps). La résistance thermique de conduction pour les coques cylindriques (par exemple les tuyaux) est calculée selon la formule (III.7) :

$$\text{Loi de Fourier : } R_{cd} = \frac{\ln(r_{out}/r_{in})}{2\pi\lambda L} \quad (\text{III.7})$$

Où r_{in} est le rayon interne [m]; r_{out} est le rayon externe [m]; L est la longueur du matériau [m]; et λ est la conductivité thermique [W / m K].

III.3.1 Conductances thermiques par conduction

Les échanges thermiques par conduction sont régis par l'équation de Fourier est la quantité de chaleur s'écoulant dans la direction de l'axe x ; S la section droite, perpendiculaire à l'axe à travers lequel s'écoule la chaleur , $-dt/dx$ est le gradient thermique le long du trajet parcouru par S ; λ est la conductivité thermique :

$$\phi = \lambda S \cdot \frac{dt}{dx} \quad (\text{III.8})$$

III.3.2 Résistance thermique de conduction

III.3.2.1 Élément géométrique parallélépipédique

Supposons un parallélépipède de longueur L , le flux de la chaleur ϕ est unidirectionnel et uniforme (constant), selon l'axe x .

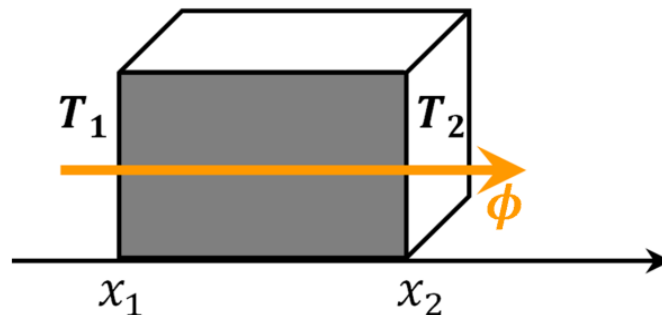


Fig.III.3 Conduction thermique unidirectionnelle dans un solide parallélépipédique

Le flux de la chaleur peut être exprimé d'après la loi de Fourier :

$$\phi = \lambda S \frac{dT}{dx} \quad (\text{III.9})$$

L'expression (IV-1) est intégrée entre x_1 et x_2 :

$$\phi \int_{x_1}^{x_2} dx = -\lambda S \int_{T_1}^{T_2} dT \quad (\text{III.10})$$

Ce qui donne :

$$\phi = \lambda S \frac{T_1 - T_2}{x_2 - x_1} = \lambda S \frac{\Delta T}{L} \quad (\text{III.11})$$

On en déduit, ainsi, la résistance thermique du solide, définie par :

$$R_{th} = \frac{\Delta T}{\phi} \quad (\text{III.12})$$

Avec :

$$R_{th} = L / \lambda S \quad (\text{III.13})$$

III.3.2.2 Élément géométrique cylindrique

La même approche permet de calculer la résistance thermique d'un cylindre creux (Figure 4-5) ou, dans le cas d'un flux de chaleur radial, en fonction du rayon interne R_1 et du rayon externe R_2 :

$$R_{th_{cylindrique}} = \ln \left(\frac{R_2}{R_1} \right) / \theta \lambda e \quad (\text{III.14})$$

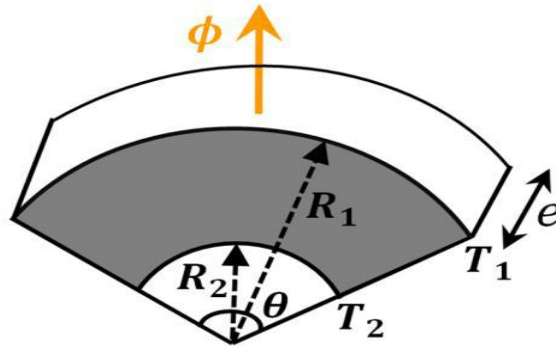


Fig.III.4 Élément géométrique cylindrique

III.4 Convection thermique par la méthode nodale

Dissipation de l'énergie thermique par le mouvement des fluides - naturels ou forcés. Le phénomène est fonction de nombreux facteurs tels que:

la densité du gaz, la viscosité et la température de surface, la caractéristique d'écoulement, etc. Malgré la formule simple (III.15), toute non-linéarité du processus est cachée dans le coefficient α . L'analyse détaillée du coefficient α peut être trouvée dans la formule (III.15) .

$$R_{cv} = \frac{1}{\alpha S_p} \quad (\text{III.15})$$

est le coefficient de transfert de chaleur [$\text{W} / \text{m}^2 \text{K}$] et S_p est la surface convective [m^2] .

Il est bien connu que les équations différentielles pour le transfert de chaleur sont similaires aux équations, qui décrivent la circulation du courant électrique. Ce fait permet de simplifier les simulations thermiques en utilisant MTN.

L'aspect principal de cette méthode est le remplacement d'éléments géométriques réels et de phénomènes thermiques par des éléments électriques tels que des résistances, des sources de courant et des capacités.

Modèle de réseau pour un problème thermique pourrait être créé et résolu à l'aide d'un simulateur de circuit. L'ensemble complet des analogies du système thermoélectrique est présenté dans le tableau 1. Les sources de chaleur d'un appareil de coupure sont les pertes ohmiques dépendant de la température des conducteurs, contacts et connexions porteurs de courant. La chaleur est conduite le long du trajet du courant et dissipée vers le gaz et l'enceinte par convection et rayonnement. L'enceinte chauffée est refroidie par convection et rayonnement vers la température ambiante. En utilisant MTN, la perte de puissance d'un conducteur est calculée par ses dimensions géométriques et les propriétés du matériau. Dissipations de chaleur.

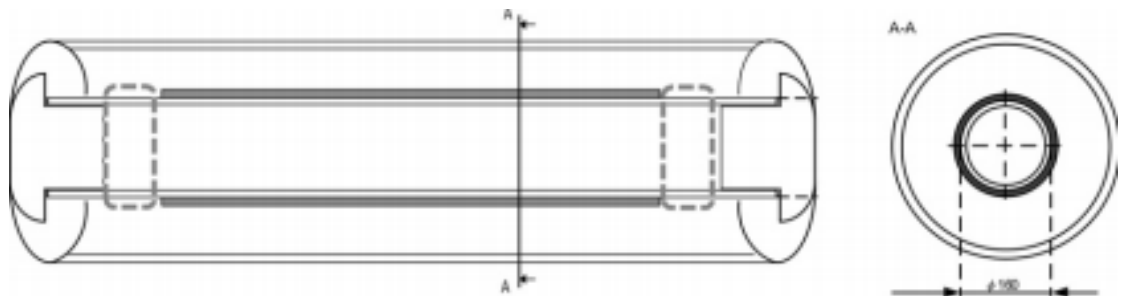


Fig.III.5 Croquis du compartiment de type GIS ELK-3 avec couche de matériau magnétique marquée en gras ligne grise, sans matériau magnétique.

$$R_{rd} = c_0 S_p \frac{1}{\left(\frac{1}{\varepsilon_1}\right) + \left(\frac{S_{p1}}{S_{p2}}\right) \left(\left(\frac{1}{\varepsilon_2}\right) - 1\right)} \cdot \frac{\left(\theta_1 - \frac{273}{100}\right)^4 - \left(\theta_2 - \frac{273}{100}\right)^4}{\theta_1 - \theta_2} \quad (\text{III.16})$$

III.4.1 Conductance thermique par convection

Le flux de chaleur échangé par convection est donné par :

$$\Phi = \alpha S (T_s - T_a) \quad (\text{III.17})$$

où T_s est la température de la surface et T_a est la température de l'air ambiant ou la température d'une autre surface. Dans le cas d'une enceinte fermée et remplis d'air, la conductance thermique est donnée par : $GV = \alpha S$ où S est la surface des échanges thermiques et α le coefficient superficiel des échanges thermiques. Le flux de chaleur par convection est un phénomène complexe, cependant le calcul des coefficients α peut être simplifié en effectuant quelques hypothèses.

III.4.2 Résistance thermique de convection

On considère une surface S de température T_s , en contact avec un fluide de température ambiante T_a .

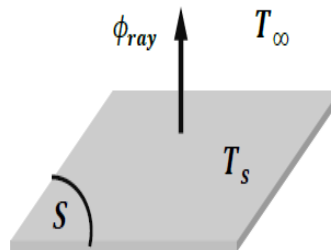


Fig.III.6 échange thermique par convection

L'échange thermique par convection est décrit par la loi de Newton qui donne le flux thermique échangé par convection entre la surface et le fluide :

$$\phi_{conv} = hS(T_s - T_a) \quad (\text{III. 18})$$

Où h est le coefficient d'échange thermique par convection.

Cette dernière équation permet de calculer la résistance thermique de convection définie par :

$$R_{th,conv} = (T_s - T_a) / \phi_{conv} = 1/hS \quad (\text{III. 19})$$

Ce coefficient h peut dépendre de la température ambiante et de la température de la surface, selon le type de refroidissement.

III.5 Rayonnement thermique par méthode nodale

Dissipation de l'énergie thermique par émission d'onde électromagnétique, principalement par une partie infrarouge du spectre qui n'a besoin d'aucun milieu pour se propager. Par rapport à la conduction, le phénomène de rayonnement dépend fortement de la température ($\sim \theta^4$), conformément à la formule (III.14) où c_0 est la constante de Stefan-Boltzmann; S_p est la surface d'émission effective [m^2]; ϵ_1 est le coefficient d'émissivité; ϵ_2 est le coefficient d'émissivité; S_{p1} est la surface effective émettrice absorbante interne [m^2]; S_{p2} est la surface effective d'émission / d'absorption externe [m^2]; θ_1 est la température absolue du corps émetteur [K]; et θ_2 est la température absolue du corps absorbant [K].



Fig.III.7 Vue GIS ELK-3

III.5.1 Conductances thermiques par rayonnement

Les échanges thermiques par rayonnement entre deux surfaces (i et j) sont définis d'une manière générale par :

$$\Phi = \epsilon_{ij} \sigma S_{ij} F_{ij} (T_j^4 - T_i^4) \quad (\text{III.20})$$

la conductance thermique correspondante est égale à :

$$GR_{ij} = \frac{\epsilon_{ij} \sigma S_{ij} F_{ij} (T_i^4 - T_j^4)}{T_i - T_j} \quad (\text{III.21})$$

exprimée aussi sous la forme :

$$GR_{ij} = \varepsilon_{ij} \sigma S_{ij} F_{ij} (T_i^2 + T_j^2) (T_i + T_j) \quad (\text{III. 22})$$

Où ε_{ij} est l'émissivité équivalente entre les deux surfaces, F_{ij} le coefficient de configuration géométrique entre les deux surfaces et σ la constante de Stefan-Boltzmann $5.729 \times 10^{-12} \text{ (W/cm}^2 \text{ K}^4 \text{)}$.

III.5.2 Résistance thermique de rayonnement

On considère une surface S de température T_s , dans un environnement ambiant de température T_∞ .

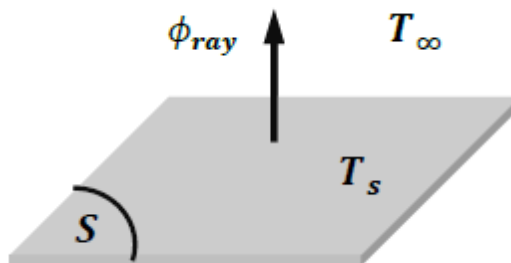


Fig.III.8 échange thermique par rayonnement

Selon la loi de Stefan décrivant le rayonnement thermique :

$$\phi_{ray} = S \cdot \varepsilon \cdot \sigma (T_s^4 - T_\infty^4) \quad (\text{III. 23})$$

Avec :

σ : Constante de Stephan ($5,6710 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$)

ε : Emissivité

ε est inférieur à 1 dont la valeur dépend de la couleur et de l'état de la surface. Pour cette loi, les températures s'expriment en Kelvin (K).

La relation (III.23) peut se mettre sous la forme :

$$\phi_{ray} = S \cdot \varepsilon \cdot \sigma (T_p - T_\infty) (T_{p3} + T_{p2} T_\infty + T_p T_{2\infty} + T_{3\infty}) \quad (\text{III. 24})$$

Alors la résistance thermique peut être déduite sous la forme:

$$R_{th_radiation} = (T_p - T_\infty) \phi_{ray} = \frac{1}{S \cdot \varepsilon \cdot \sigma} (T_{p3} + T_{p2} T_\infty + T_p T_{2\infty} + T_{3\infty}) \quad (\text{III.25})$$

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons étudiés la méthode des réseaux thermiques (MTN) puis les modes thermiques (conduction, convection et rayonnement) par la méthode thermique nodale (MTN). A la fin, on a étudié couplage électrothermique.

Chapitre IV
Résultats de
simulation et
discussions

VI.1. Introduction

Ce quatrième chapitre va nous permettre de valider notre travail. Pour ce faire nous présentons quelques applications.

La première étape est consacrée à l'introduction de logiciel de calcul ATP-Draw, et l'implémentation de chaque élément de modèle thermique équivalent.

Nous consacrons ensuite des applications aux calculs des températures générés par une onde du courant dans un équipement de manœuvre sans blindage, ainsi les résistances thermiques équivalents de chaque milieu.

Nous proposons aussi quelques configurations aux calculs de distribution de température dans une chambre de manœuvre avec blindage. Ces applications vont ainsi nous permettre de proposer un début de solution du point de vu électrothermique

VI.2. Définition de logiciel EMTP-ATP

L'ATP est un logiciel universel de programmation pour la simulation numérique de phénomènes transitoires d'électromagnétique ainsi que la nature électromécanique. Avec ce programme numérique, des réseaux complexes et les systèmes de contrôle de la structure arbitraire peuvent être simulés.

ATP a des capacités de modélisation et des fonctionnalités supplémentaires importantes outre les calculs transitoires. Il a été développé en permanence par des contributions internationales au cours des 20 dernières années.

Modélisation de réseaux thermiques par ATP-EMTP et la simulation de transfert de chaleur

Création de composants de réseaux thermiques dans MODELS

VI.2.1 Résistance thermique de la conduction

Il permet de déterminer une résistance thermique pour la conduction, qui ne dépend pratiquement pas de la température. Par conséquent, sa description mathématique est très simple. La description du modèle en langage MODELS est listée dans le cadre ci-dessous.

```

MODEL R_CD
DATA l, lambda, a, b
VAR R_r
INPUT t2, t1
OUTPUT R_r
INIT
R_r:=1/(lambda*a*b)
ENDINIT
EXEC
ENDEXEC

```

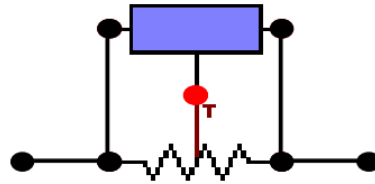


Figure. IV.1 Modèle ATP d'une résistance thermique conductrice associée à une résistance non linéaire de type 91.

VI.2.2 Résistance thermique pour le rayonnement

Le transfert de chaleur par rayonnement n'a besoin d'aucun milieu pour sa propagation, car l'énergie est dissipée par émission d'ondes électromagnétiques. Pour la section DATA du modèle et peuvent être facilement modifiés dans l'environnement ATPDraw.

La formule suivante peut être appliquée :

$$R_{rd} = \frac{1}{\alpha_{rd} S_p} \quad (VI.1)$$

La description en langage MODELS est jointe ci-dessous :


```

MODEL R_RD
CONST c0 {val:5.77}
DATA Sp1,eps1,Sp2,eps2
VAR eps,alfap,x1,x2,R_rd
INIT
eps:=1/(1/eps1+(Sp1/Sp2)*(1/eps2-1))
ENDINIT
INPUT t2, t1
OUTPUT R_rd
EXEC
x1:=(t1+273)/100)**4
x2:=(t2+273)/100)**4
IF t=0 THEN alfap:=1
ELSE alfap:=eps*c0*(x2-x1)/(t2-t1)
ENDIF
R_rd:=1/(alfap*Sp1)
ENDEXEC
ENDMODEL

```

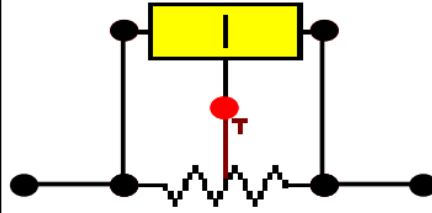


Figure. IV. 2 Modèle de résistance thermique pour le rayonnement.

VI.2.3 Résistance thermique pour la convection

Le transfert de chaleur par convection, ou simplement la convection, est le processus de transfert de chaleur exécuté par l'écoulement d'un fluide. Le fluide agit comme transporteur ou bande transporteuse pour l'énergie qu'il puise (ou délivre à) une paroi solide. La convection est ce mécanisme spécial de transfert de chaleur dans lequel les caractéristiques de l'écoulement (par exemple, la distribution de la vitesse et la turbulence) affectent grandement le taux de transfert de chaleur entre la paroi et le flux.

Le taux d'énergie transférée par convection peut être exprimé dans le style de la loi d'Ohm et est régi par la loi de Newton

$$R_{cv} = \frac{1}{\alpha S_p} \quad (VI. 2)$$

où : S_p - aire de la surface convective, - coefficient de transfert de chaleur.

```

MODEL R_CV
DATA lw, Sp, c1, n1
VAR Nu, ts, gp, alfak, R_c
FUNCTION
lambda_air(x):=0.01*(2.44+0.006857*
x)
FUNCTION Ks POINTLIST
(0,14.5), (5,13.25), (10,12.20), (15,1
1.30),
(20,10.5), (25,9.75), (30,9.00), (35,8
.35),
(40,7.75), (45,7.20), (50,6.80), (55,6
.30),
(60,5.90), (65,5.50), (70,5.10), (75,4
.85),
(80,4.55), (85,4.30), (90,4), (95,3.75
),
(100,3.50), (inf,3.00)
INPUT t2, t1
OUTPUT R_c
EXEC
IF t=0 THEN ts:=1 gp:=1
ELSE ts:=abs(0.5*(t1+t2))

Gp:=Ks(ts)*1e7*(t2-t1)*lw**3
ENDIF
Nu:=c1*(abs(gp))**n1
IF t=0 THEN alfak:=1
ELSE
alfak:=Nu*lambda_air(ts)/lw
ENDIF
R_c:=1/(alfak*Sp)
ENDEXEC
ENDMODEL

```

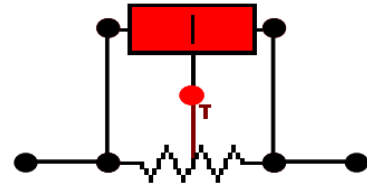


Figure. VI. 3 Modèle de résistance thermique pour la convection.

VI.2.4 Sources de chaleur

La majorité des pertes dans le système d'alimentation sont le résultat d'une caractéristique physique naturelle des résistances des conducteurs électriques. Ces pertes, souvent appelées pertes Joule, sont calculées à partir de l'équation

$$P_{Joule} = I^2 k_w \frac{\rho_{20}(1 + \alpha_{20}(\theta - 20))}{S} \quad (VI.3)$$

Le coefficient d'effet de peau k_w dépend de nombreux facteurs et nécessite des calculs individuels.

Heureusement, il existe des algorithmes élaborés à partir de formules empiriques, selon les normes CEI. Cependant, il est également possible de prendre des valeurs déjà calculées, si le cas étudié correspond aux données tabulaires.

```

MODEL POW_J
INPUT t2
OUTPUT Pow
DATA k, I, tstop, ro, alfa, S, lsz
VAR R20, Pow, Rez, Ip, ros
INIT ros:=ro*1e-6
R20:=ros/S
ENDINIT
EXEC
IF t<=tstop THEN Ip:=I
ELSE Ip:=0 ENDIF
IF t=0 THEN Pow:=k*Ip**2*R20*lsz
Rez:=R20
ELSE Pow:=k*Ip**2*R20*(1+alfa*(t2-
20))*lsz
Rez:=R20*(1+alfa*(t-20))
ENDIF
ENDEXEC
ENDMODEL.

```

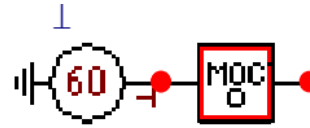


Figure. VI. 4 Le modèle des pertes Joule.

VI.3 Validation de modelé ATP

Comme validation, il est considéré un jeu de barre omnibus en aluminium dans l'espace libre. L'objectif du calcul et de la simulation est le problème d'évaluation du courant nominal indiqué dans la question suivante.

Quelle est la valeur du courant alternatif nominal admissible qui chauffe le jeu de barres jusqu'à la température $\theta=100^{\circ}\text{C}$ en régime permanent ? La température ambiante $\theta=40^{\circ}\text{C}$ a été supposée. Les dimensions transversales des barres omnibus sont de $0,1 \times 0,01 \text{ m}$, coefficient d'effet peau $=1,12$.

VI.3.1 Approche réseau thermique

La chaleur apparaît dans le conducteur en raison des pertes Joule du flux de courant. Il existe deux modes de transfert de chaleur à partir de la surface latérale, la convection et le rayonnement. Seuls deux nœuds, notés ϑ_0 et ϑ_1 , sont nécessaires pour la création du réseau, où: ϑ_0 – température ambiante, [K], ϑ_1 – température du jeu de barres, [K] et P_1 – puissance des pertes Joule, [W].

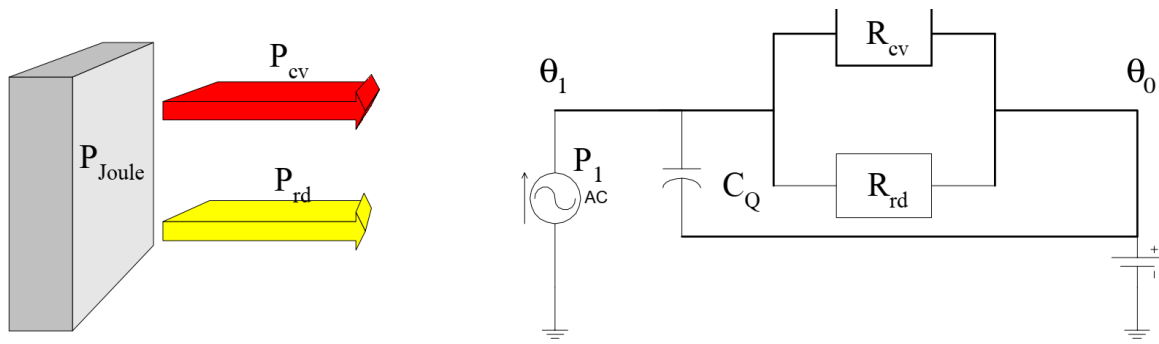


Figure.IV.4 schéma de procédé de transfert thermique de jeu barres omnibus et son réseau thermique équivalent

Calcul de la capacité thermique :

Pour calculer la valeur de la capacité thermique, l'équation (4) a été utilisée c_s - chaleur spécifique pour l'aluminium, $c_s=891,8$ [J/kg·K]

γ - masse volumique, $\gamma=2,7 \cdot 10^3$ [kg/m³]

C_Q - capacité thermique, [J/K] ; $C_Q=2408,9$ J/K

VI.3.2 Approche analytique

Toutes les étapes menant à la solution analytique [3] du problème de transfert de chaleur en régime permanent seront présentés.

VI.3.3 Résistance thermique pour la convection

- La température moyenne m est calculée : $\vartheta_m = \frac{\vartheta_0 + \vartheta_1}{2} = \frac{40^\circ C + 100^\circ C}{2} = 70^\circ C$ (VI.4)
- La valeur du coefficient k_s est tirée de la Fig.5 à la température ϑ_m : $k_s = 5,1 \cdot 10^7$ 1/Km³
- Le produit $GrPr$ est déterminé : $GrPr = k_s I_w^3 \Delta \theta = 3.06 \cdot 10^6$ (VI.5)
- Le nombre de Nusselt est calculé, $c=0.6$ et $n=0.25$: $Nu = 0.6 \sqrt[4]{306 \cdot 10^4} = 25.1$ (VI.6)
- conductivité thermique $\lambda(\vartheta) = 0.01(2.44 + 0.006857 * \vartheta)$ de l'air est calculée $\lambda = 2.92 \cdot 10^2$ W/mK
- La valeur du coefficient de transfert de chaleur par convection est calculée à partir de l'équation

$$\alpha_{cv} = \frac{7.33W}{Km^2}$$
 (VI.7)
- Valeur de la résistance thermique convective à partir de l'équation $R_{cv} = 0.62$ K/W (VI.8)

VI.3.4 Résistance thermique pour le rayonnement

La valeur du coefficient de transfert thermique radiatif est calculée à partir de l'équation

$$\alpha_{rd} = 8.45 \frac{W}{Km^2} \quad (VI. 9)$$

$$\text{Résistance thermique pour le rayonnement de } R_{rd} = 8.45 \frac{W}{K} \quad (VI. 10)$$

VI.4 Simulation par ATP

Selon le réseau thermique équivalent illustré à la figure IV.4, un circuit ATP approprié a été construit au moyen des outils ATPDraw (figure IV.5). Une fonction échelonnée du courant $I=2250A$ activé à $t=0$ a été supposée, et l'élévation et la chute de température de la barre omnibus ont été observées, ainsi que les valeurs des résistances thermiques pendant le processus de simulation.

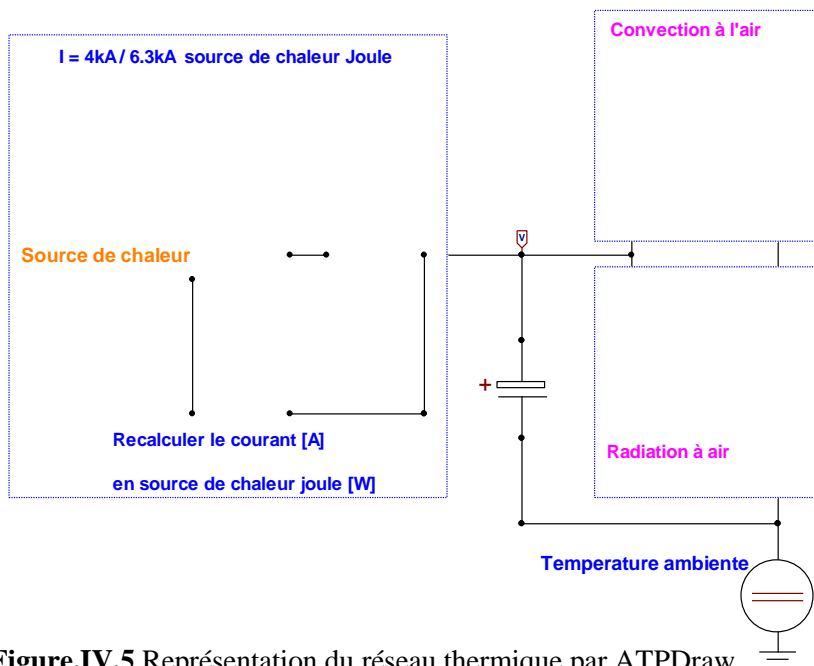


Figure.IV.5 Représentation du réseau thermique par ATPDraw.

Il convient de mentionner que les paramètres ATP doivent être adaptés à une nouvelle plage de durée de processus, qui est généralement comptée en heures. Par conséquent, $dt=10s$ et $t_{stop}=5e^4s$, typiques des réseaux thermiques, diffèrent fortement des paramètres ATP par défaut.

Une attention particulière doit également être apportée aux unités de capacité (en μF par défaut) et le facteur d'échelle 106 doit être pris en compte, car le $[F] \leftrightarrow [J/K]$.

La preuve évidente de la bonne qualité des résultats de la simulation est la même valeur des résistances thermiques lorsque la simulation atteint son état stationnaire, et que la température du jeu de barres devient finalement égale à $\theta=100^{\circ}\text{C}$, comme le montrent les figures IV.6, IV.6 et la figure.IV.8.

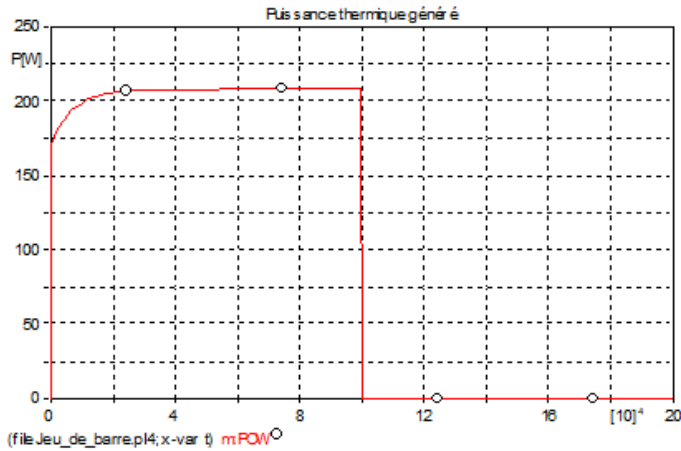


Figure.VI. 6 Puissance thermique générée

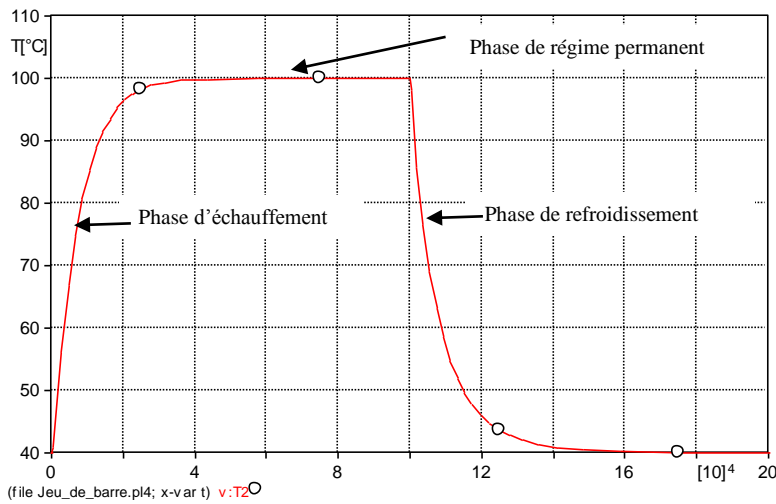


Figure. IV.7 Variation de la température du jeu de barres pendant la simulation de chauffage et de refroidissement.

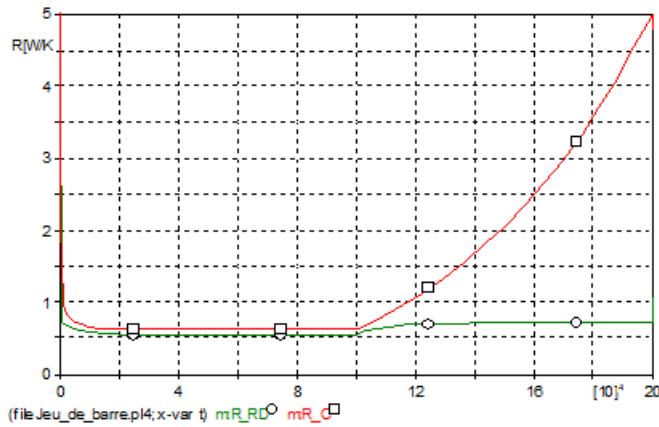


Figure.IV. 8 Résistances thermiques pendant le processus de simulation.

VI.4.1 Application du modèle sur système des jeux barres triphasé omnibus isolées au SF6

Dans le deuxième travail, un système triphasé des jeux de barres omnibus tubulaires isolées au SF6 en configuration plate a été étudié.

Une valeur de courant admissible doit être trouvée en supposant que le tuyau intérieur est chauffé à 100 °C, tandis que le tuyau externe ne dépasse pas 70 °C en régime permanent. La température ambiante $\theta_0=40^\circ\text{C}$ est supposée.

Approche réseau thermique

Le réseau thermique référencé à un seul jeu de barres peut être modélisé. Il s'agit d'une routine typique dans les calculs de courant admissible des conducteurs, où l'interférence des conducteurs voisins est incluse dans les pertes de puissance d'un tuyau externe (gaine).

Cela simplifie bien entendu une structure de réseau thermique. Dans un tel cas, seuls quatre nœuds et deux sources de chaleur sont nécessaires, selon le tableau suivant :

Température	Perte des puissances
θ_3 – température du noyau tubulaire	P_{J1} – puissance de pertes Joule dans la gaine tubulaire,
θ_2 – température du gaz interne	P_{J3} – puissance des pertes Joule dans le noyau tubulaire.
θ_1 – température de la gaine tubulaire	
θ_0 – température ambiante	

Tableau VI.1 les nœuds et les sources des puissances dans le système étudié.

La chaleur produite dans le noyau (tuyau interne) est transférée par rayonnement directement à la gaine (tuyau externe) et par convection libre au gaz interne (SF_6). Le même gaz interfère avec le tuyau extérieur, ce qui, d'autre part, produit également des pertes Joule. La surface extérieure du tuyau externe dissipe la chaleur par rayonnement et convection vers l'environnement, comme auparavant. La capacité thermique du noyau, du gaz SF_6 et de la gaine est également prise en compte et présentée dans le tableau ci-dessous.

CQ [J/K]	
ame, C_{Q3}	5567,5
SF_6 , C_{Q2}	325,4
gaine, C_{Q1}	9350,2

Tableau VI.2 capacité thermique des éléments de système

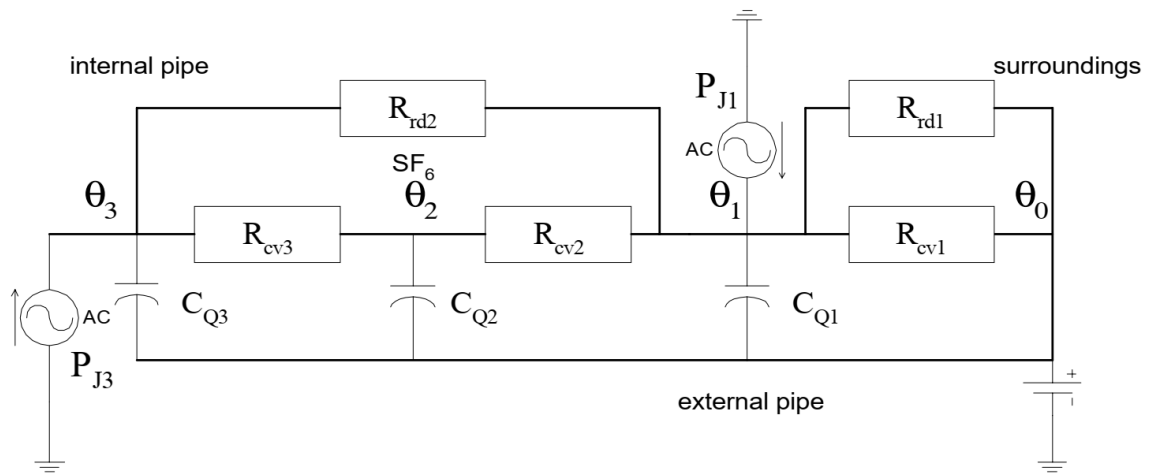


Figure.IV.9 Réseau thermique équivalent pour le système illustré à la Figure VI.7

VI.4.2 Approche analytique

Seuls les calculs de pertes Joule résultants de la gaine seront joints en détail, car ils sont nouveaux [3] par rapport à l'exemple précédent.

D'après le réseau thermique de la Figure. IV. 9 adapté aux conditions de régime permanent, où les capacités thermiques n'existent pas, on peut écrire :

$$\theta_3 - \theta_0 = (\theta_3 - \theta_1) + (\theta_1 - \theta_0) \tag{VI.11}$$

ou, sous forme équivalente :

$$\theta_3 - \theta_0 = P_3(R_{rd2} // (R_{cv3} + R_{cv2})) + (P_3 + P_1)(R_{rd1} // R_{cv1}) \tag{VI.12}$$

où les symboles '1' et '2' désignent respectivement 'Sh' (gaine) et 'C' (noyau), et :

$$P_3 = k_c I_c^2 \frac{\rho_{20c}}{S_c} (1 + \alpha_{20c}(\theta_3 - 20)) \quad \text{- pertes de puissance du noyau}$$

$$P_1 = k_{Sk} I_c^2 \frac{\rho_{20Sh}}{S_{Sh}} (1 + \alpha_{20Sh}(\theta_1 - 20)) \quad \text{- les pertes de puissance de la gaine}$$

où m est le paramètre de réglage (dans ce cas m = 1)

Enfin, nous pouvons obtenir la valeur du courant nominal admissible :

$$I_c = \sqrt{\frac{\theta_3 - \theta_0}{K_c \frac{\rho_{20c}}{S_c} (1 + \alpha_{20c}(\theta_3 - 20)) R_w + m k_{Sk} K_c \frac{\rho_{20Sh}}{S_{Sh}} (1 + \alpha_{20Sh}(\theta_1 - 20)) (R_{rd1} // R_{cv1})}} = 3158A \tag{VI.13}$$

où R_w désigne :

$$R_w = R_{rd1} // (R_{cv3} + R_{cv2}) + R_{rd1} // R_{cv1} \tag{VI.14}$$

VI.4.3 Résultats de la simulation

Un réseau thermique équivalent en environnement ATPDraw a été construit (Figure.IV.10).

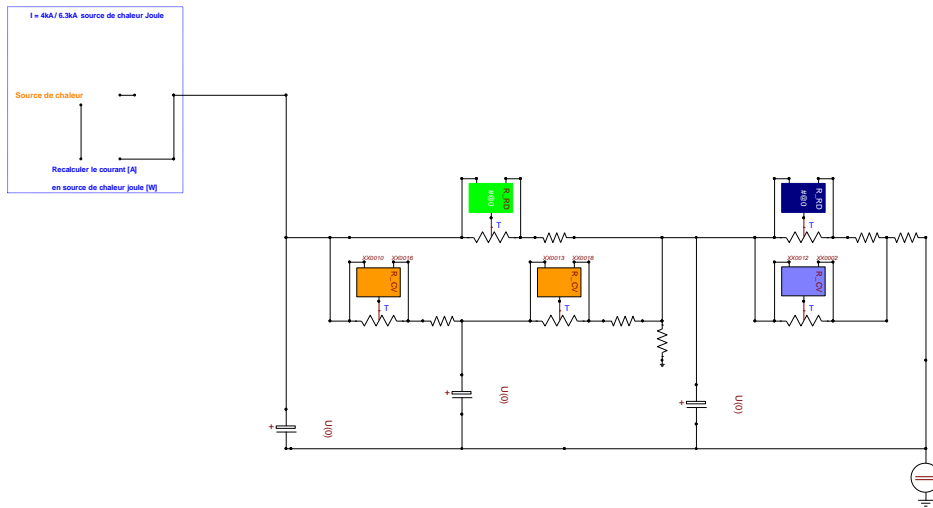


Figure. IV.10. Réseau thermique équivalent dans ATPDraw

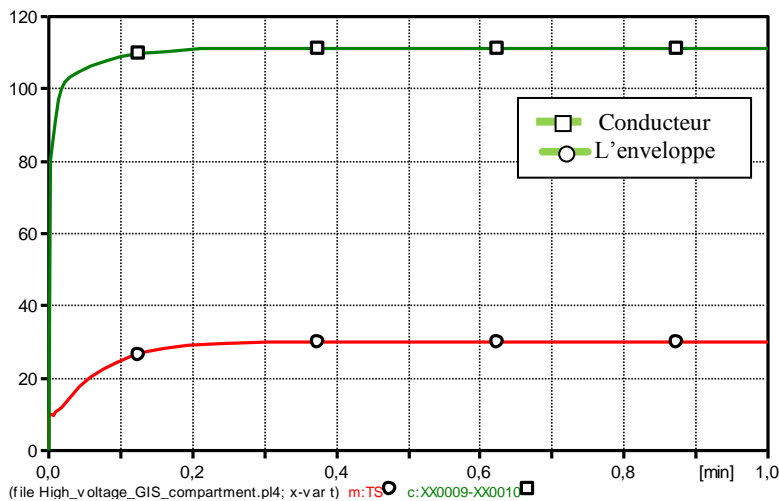


Figure. IV. 11 Variation radiale de la température pour le modèle 2

Les pertes de puissance de la gaine ont également été prises en compte, selon l'algorithme présenté dans la partie précédente. Le modèle des pertes Joule du cœur a été considérablement amélioré et équipé de calculs automatiques du coefficient d'effet de peau.

Le courant nominal $I=2250A$ a été appliqué afin de contrôler également l'échauffement du noyau, du gaz SF_6 et de la gaine. Pour une meilleure comparaison des résultats finaux, un réseau thermique équivalent basé entièrement sur des résistances constantes a également été considéré.

Conclusion

Dans ce quatrième chapitre, nous avons présenté quelques applications pour illustrer notre travail.

Nous avons traité des applications citées dans la littérature qui se rapporte à des situations réelle dans les dispositifs des manœuvres situées dans les postes blindés qui sont logés dans le gaz d'isolement SF₆.

Les résultats de calcul que nous avons obtenus pour le calcul les variations des températures sont ceux déjà réalisés par Mariusz Stosur et al. [3].

Le programme ATP équipé de MODELS est devenu un outil idéal pour la modélisation avancée des réseaux thermiques et les simulations dynamiques de transfert de chaleur. En raison des températures des nœuds suivies en ligne, il a été possible de créer des modèles dynamiques de résistances thermiques non linéaires basés sur l'élément de type91.

L'utilisation du programme ATP dans un nouveau domaine de pratique du génie électrique a été confirmée dans de nombreux autres exemples de simulation. De nombreux nouveaux modèles ont été créés et utilisés dans de modéliser des appareils électriques typiques représentées de manière équivalente par leurs circuits de réseau thermique.

Conclusions

Générale

Conclusion :

Les phénomènes de chaleur dans les appareils et appareils électriques en fonctionnement sont les conditions qui définissent leurs limites actuelles. Par conséquent, en utilisant les techniques de calcul permettent aux ingénieurs d'analyser la température aspects des systèmes dans la phase de conception initiale. Modèles de simulation avec une précision éprouvée sont un must pour la conception thermique de l'électricité d'appareil. De telles analyses appuient l'estimation de la refroidissement ou modification de la construction pour répondre aux conditions. Par conséquent, le concept de réseau thermique offre une approche efficace et intuitive, notamment pour les ingénieurs avec une vitesse de calcul élevée et une bonne précision.

Les MODÈLES de réseaux thermiques du GIS busduct ont été construits. Des calculs et des résultats de simulation ont été obtenus. Les MODÈLES ont fourni des simulations relativement proches pour la température du compartiment par rapport à la mesure résultats. De plus, avec l'utilisation du logiciel ATP-EMTP, le les constantes de temps pour l'augmentation de la température ont été lues. L'ATP-Le modèle EMTP surestime la valeur thermique de plusieurs degrés Celsius par rapport au modèle OrCAD. Cela est duaux fait que dans le modèle ATP-EMTP, seule la thermique fondamentale dépendances ont été implémentées. Une extension supplémentaire est possible.

Références bibliographiques

Bibliographie :

- [1]19 – Réseaux HTA- Transformateurs HTA / BTA – Gestion de l'énergie , pp. 11.
- [2] Mémoire de fin d'étude de Master professionnel, Thème ,“Technologie Des Equipements Electriques Des Postes HTB,” présenté par ,” Samir Berkane” , pp. 15–21, 2017.
- [3] Mémoire de fin d'étude de Master professionnel . Thème ,“Etude et Dimensionnement Des Protections du poste électrique 60,30 KV de Zarzaitine,” présenté par ,” Karim Mokhtari ,Belkacem Ichir ” , pp. 5 ,16 , 18 , 25 , 26, 27, 2017.
- [4] Documentation ABB du poste électrique , pp.4.
- [5] Mémoire de fin d'étude de Master professionnel . Thème ,“Etude et Dimensionnement D'un poste de Transformation HTB /HTA (60 / 30 kv) d'Ouled Moussa ” Université Mouloud Mammeri de Tizi , présenté par ,” Hayet Messah ,Tarek Sasi Oufella ” , pp. 12 - 15, 2014.
- [6] [.wikipedia. Poste électrique sous enveloppe métallique](#)
- [7] ,” Guide conception des réseaux électriques ”, Schneider électrique T et D 6883427 /A.
- [8] Jean-Pierre TAILLEBOIS, Postes sous enveloppe métallique SEM), vol. D4590, [Techniques de l'ingénieur](#), pp. 5 , février 2001
- [9] Licence Energétique , présenté par ,”D . Tayeb OUKSEL ” , pp. 5, 6 ,12 ,13 14, 19 ,25 ,26 , 2016-2017
- [10] cours de transferts thermiques , Conduction et rayonnement ”Philippe Marty ” , pp. 5,13 , 14 , 18 ,21, 2012-2013.
- [11] Transferts thermiques (Conduction , convection et rayonnement),Transparents de cours ,MP ,Lycée Montesquieu (Le Mans). Olivier Granier ” , pp.39 , 48 .
- [12] [.wikipedia. Transferts thermiques](#) .
- [13] .Report on research work, (Courtesy of Dresden TU), 1975

