

Article 13. Technologie des circuits intégrés programmables FPGA
RANDRIAMANDIMBISOA Mirantsoa Volana¹, Fanjanirina RAZAFISON¹, Harlin ANDRIATSIHOARANA²

¹Institut Supérieur de Technologie d'Antananarivo

²Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo

Correspondant : mirantsoanany@gmail.com

Mots clés : industrie, technologie, circuits intégrés, programmation, énergie.

Résumé

Le traitement des informations issues des systèmes industriels se fait par la branche de l'électronique de commande qui peut être soit analogique, soit numérique. Dans le cas du numérique, la technologie utilisée peut être câblée, programmée ou semi-programmée. Cependant, la technologie câblée implique l'utilisation d'un nombre important de circuits intégrés logiques. Ceci a pour conséquences un prix de revient élevé, une mise en œuvre complexe et un circuit imprimé de taille importante. L'évolution extrêmement rapide des circuits programmables permet de résoudre ce problème en mettant à disposition des circuits intégrés avec plusieurs millions de portes logiques et à des fréquences de fonctionnement très élevées. Le FPGA ou Field Programmable Gate Arrays figure parmi la famille de ces circuits programmables.

Le FPGA traduit en « réseaux logiques programmables » est un composant entièrement reconfigurable qui contient un très grand nombre de macro cellules avec une très grande souplesse d'interconnexion entre eux. Il a l'avantage de pouvoir traiter plusieurs signaux en parallèle ; et propose de ce fait beaucoup plus de ports d'entrée/sortie que le plus puissant des microcontrôleurs, en plus d'être plus rapide. La programmation du circuit fait appel à des langages très spécialisés dans la description des circuits intégrés comme le langage VHDL ou Very High Speed Integrated.

Au laboratoire de l'Institut Supérieur de Technologie d'Antananarivo, nous avons à disposition le kit de démarrage DK-START-3C25N avec un FPGA Cyclone III. Nos recherches se portent sur l'exploitation de ce matériel dans le contrôle et la gestion d'énergie en se basant sur la commande de convertisseurs statiques tels que les gradateurs et les onduleurs. Cette technologie répond aux défis des commandes modernes de convertisseurs qui se résument à une gestion efficace du flux d'énergie et de ses caractéristiques telles que la forme d'onde des tensions et courants, le taux d'harmoniques, une réduction du coût, une fiabilité de fonctionnement et une précision des contrôles en cas de régulation.

I- Introduction

L'évolution de l'industrie a toujours été associée à celle de la technologie. La mécanique, l'électricité, l'apparition de l'automatisme et la technologie numérique se sont succédé pour former, jusqu'à présent, les quatre ères de révolutions industrielles. Le domaine de l'électronique et l'informatique ont beaucoup évolué durant les deux dernières périodes, avec en tête l'arrivée du transistor et du microprocesseur. Dans les systèmes industriels, ces deux termes sont souvent dépendants car ils œuvrent ensembles dans leur gestion, leur contrôle et leur commande. Les ordinateurs sont nés de l'électronique et l'évolution de l'informatique contribue à son tour au développement des circuits numériques. Dans cette optique, on trouve actuellement de circuits intégrés programmable à partir d'un simple ordinateur directement sur la carte où ils vont être utilisés. En cas d'erreur, ils sont reprogrammables électriquement sans avoir à extraire le composant de son environnement.

Au niveau de son programme de formation, l'IST-T insiste particulièrement sur la nécessité du renforcement de plusieurs aspects chez ses étudiants comme la maîtrise des techniques et des technologies, des existants aux plus modernes en passant par les plus adaptées et appropriés. D'où plusieurs travaux de recherches basés sur l'exploitation des circuits programmables comme le microcontrôleur et Field Programmable Gate Arrays (FPGA) ou réseaux logiques programmables, qui sont à disposition au sein de son laboratoire de physique. Ces travaux concernent par exemple la gestion efficace du flux d'énergie électrique et de ses caractéristiques et ont abouti à plusieurs résultats grâce à des simulations et à des réalisations.

En effet, la plupart de ces circuits peuvent répondre aux défis des commandes modernes de tous systèmes industriels car ils sont plus performants à un coût toujours plus faible, plus fiables sans problèmes de connectique et peuvent travailler à des fréquences très élevées. Par conséquent, cela permet aux industriels de présenter un meilleur rapport qualité/prix pour leurs produits ou services.

II- Matériel

Les microprocesseurs sont les premiers circuits numériques programmables à être inventés, ils ont pour avantage de rendre plus facile la commande et la maintenance en électronique. Mais cette technologie reste au niveau logiciel et certains avantages de l'électronique analogique sont perdus. Par exemple, ils sont moins rapides. Alors, de nouvelles solutions numériques comme les FPGA sont apparus. FPGA ou Field Programmable Gate Array est traduit en « réseaux logiques programmables ». C'est un Circuits intégrés programmables, inventés en 1985. Ils permettent de retrouver en même temps les avantages des circuits analogiques et des circuits numériques.

II.1 Architecture d'un FPGA

L'architecture générale d'un circuit FPGA de la figure 1 contient un très grand nombre de macros cellules avec une très grande souplesse d'interconnexion entre eux. Dans le FPGA, le temps de propagation dans les couches logiques du circuit dépend de l'organisation et de la distance entre les macros cellules interconnectées.

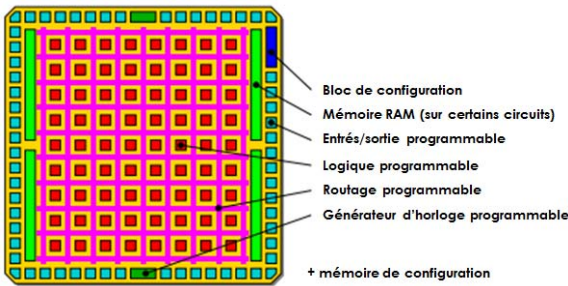


Figure 1 : Structure générale d'un FPGA

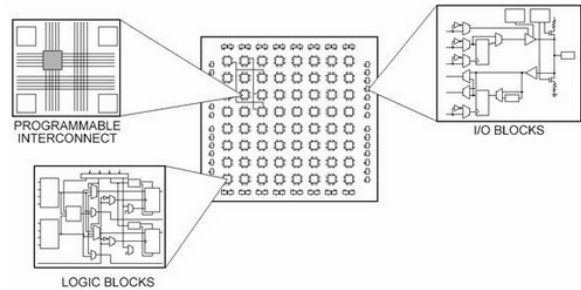


Figure 2 : Architecture interne d'un FPGA

L'architecture interne de la figure 2 est composée de la couche dite « circuit configurable » qui est constituée d'une matrice de blocs logiques configurables permettant de réaliser des fonctions combinatoires et des fonctions séquentielles. Tout autour de ces blocs logiques configurables se trouve des blocs entrées/sorties dont le rôle est de gérer les entrées/sorties réalisant l'interface avec les modules extérieurs.

II.2 Kit de démarrage DK-START-3C25N FPGA CYCLONE III

Au laboratoire de l'Institut Supérieur de Technologie d'Antananarivo, nous avons à disposition le kit de démarrage DK-START-3C25N avec un FPGA Cyclone III. Nos recherches se portent sur l'exploitation de ce matériel dans le contrôle et la gestion d'énergie en se basant sur la commande de convertisseurs statiques. L'architecture FPGA cyclone III permet de concevoir des systèmes à performance 60% supérieure, en moyenne, à celle de ses concurrents. Les principales caractéristiques de la carte sont énumérées dans la figure 3.

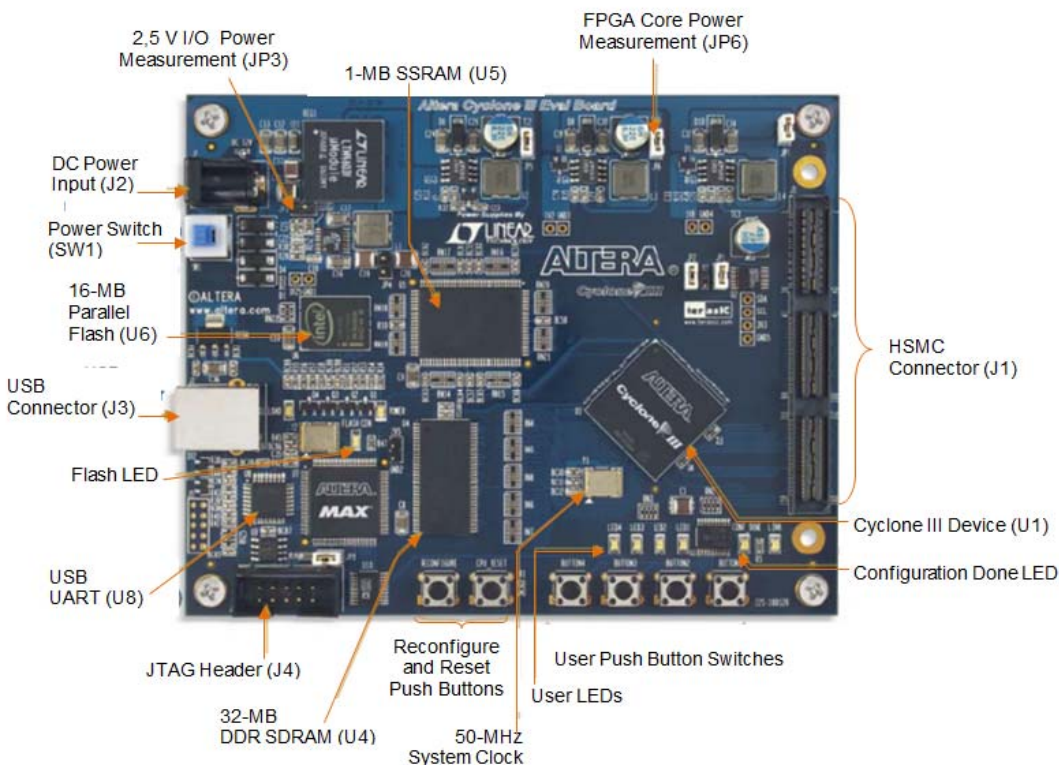


Figure 3 : Vue d'ensemble de la carte DK-START-3C25N

III- Méthode

La programmation du circuit FPGA consiste par le biais de l'application d'un potentiel adéquat sur la grille de certains transistors à effet de champ à interconnecter ses éléments internes afin de réaliser les fonctions souhaitées et d'assurer la propagation des signaux. Les étapes de programmation sont assistées par ordinateur et présentent la chronologie suivante :

- description de la fonction souhaitée par entrée schématique ou syntaxique. Dans ce dernier cas, on utilise un langage approprié appelé HDL ou Hardware Description Language;
- simulation logique puis temporelle de la fonction réalisée et éventuellement retour à l'étape précédente ;

- compilation et génération d'un fichier de programmation ;
- programmation et test physique du composant.

IV- Résultats

Nous avons exploité carte DK-START-3C25N pour la commande des convertisseurs d'énergie électrique. Pour ma part, j'ai réalisé la commande d'un gradateur nouveau modèle composé de douze transistors.

Le but est d'étudier le comportement du convertisseur à partir des courbes de tension et de courant résultant de plusieurs simulations.

Commande par FPGA d'un gradateur nouveau modèle triphasé

Toutes les courbes obtenues résultent de la cosimulation entre les logiciels MODELSIM et MATLAB Simulink. Le circuit de puissance est modélisé sous Matlab Simulink (figure 4). La charge en sortie du gradateur est composée de trois résistances montées en étoile de 2 kW (figure 5). La tension d'alimentation est de $3 \times 380V$.

Les signaux de commandes des transistors sont visualisés sous MODELSIM (figure 6). Nous avons des résultats pour un nombre d'impulsion noté $k = 37$. Les caractéristiques électriques en sortie du gradateur nouveau modèles sont illustrées à partir des (figures 7, 8, 9).

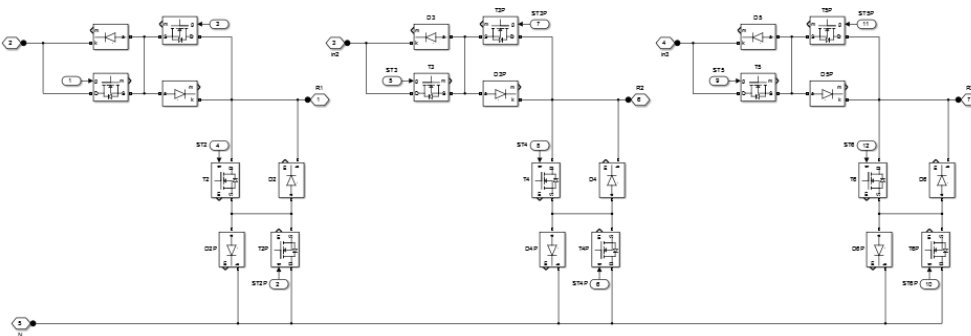


Figure 4 : Modèle du gradateur nouveau modèle triphasé

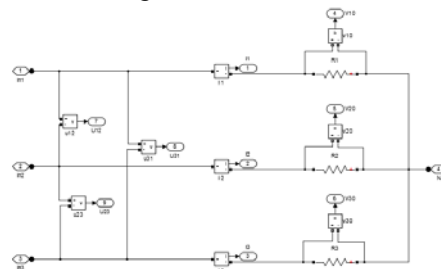


Figure 5 : Charges résistives montées en étoile

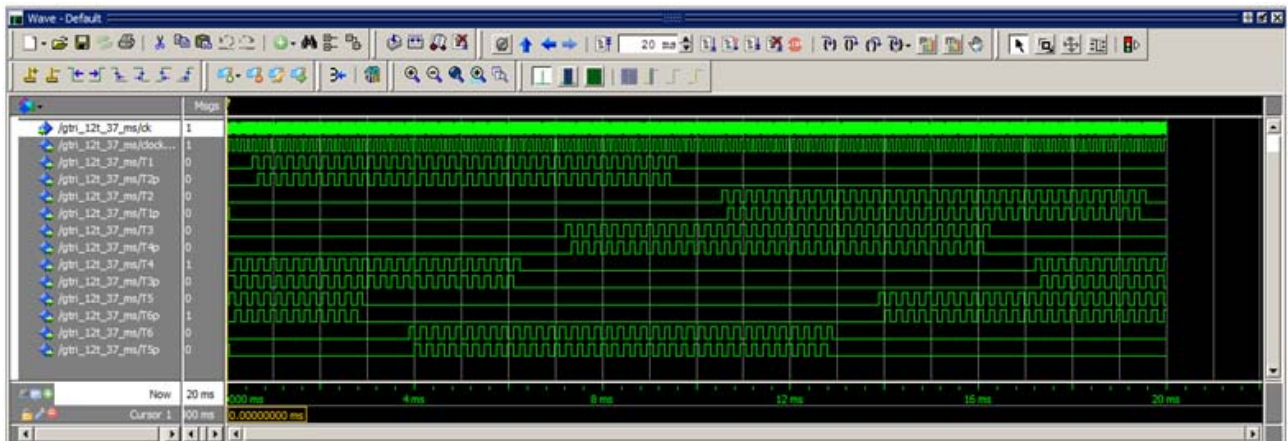


Figure 6 : Résultats de simulation de la commande triphasée avec un nombre d'impulsion $k=37$

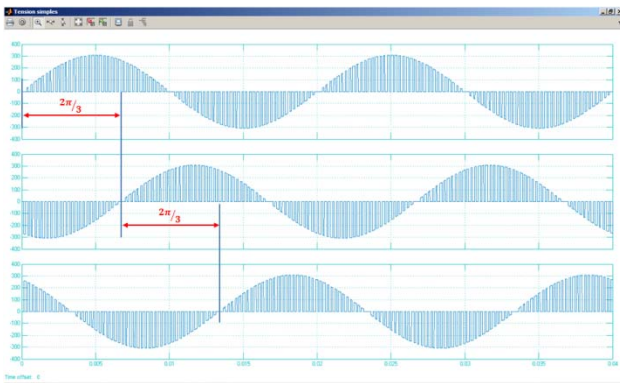


Figure 7 : Tensions simples en sortie du gradateur nouveau modèle

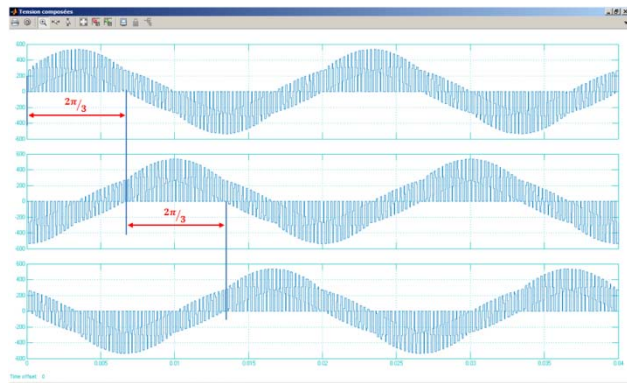


Figure 8 : Tensions composées en sortie du gradateur nouveau modèle

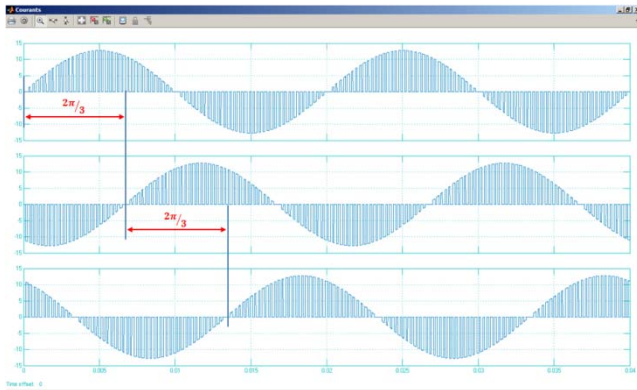


Figure 9 : Courants en sortie du gradateur nouveau modèle

V- Discussions et conclusion

Techniquement parlant, un FPGA peut être utilisé pour résoudre tout problème qui est calculable. Ceci est trivialement prouvé par le fait qu'un FPGA peut être utilisé pour mettre en œuvre un microprocesseur souple. Leur avantage réside dans le fait qu'ils sont parfois nettement plus rapides pour certaines applications en raison de leur nature parallèle et d'une optimalité en termes de nombre de portes utilisées pendant un certain processus. Par conséquent, bien que nous ayons exploité le FPGA dans la commande de convertisseur de puissance, comme dans le cas du gradateur nouveau modèle, il peut en même temps gérer plusieurs autres systèmes simultanément. En effet, notre étude n'est encore qu'une petite partie de l'exploitation des capacités du FPGA car au sein d'une industrie, ce circuit peut assurer à la fois tous les calculs et les commandes électronique associée à la production, au système de réseau, à l'automatisme, à la maintenance, à l'énergie, à la surveillance, au stock. Outre les ateliers, les applications courantes des FPGA sont plus vastes et s'étendent dans les domaines de l'aéronautique et la défense, automobile, électronique grand public, calcul Haute Performance, médical, traitement de vidéo et d'image.

Les technologies telles que le FPGA sont étroitement liées à la thématique concernant « Les recherches scientifiques et technologiques, appui au développement et à l'innovation et à la création d'emploi ». Grâce à ses nombreux avantages, l'exploitation des circuits intégrés programmables impactent sur le développement tant au niveau industriel qu'au niveau national. En termes d'innovation, bien que le FPGA soit apparu vers les années 80, cette technologie reste très performante alors qu'ils ne sont pas assez exploités dans les pays comme Madagascar. De plus, l'utilisation de ces technologies pourrait amener à la création de nouveaux horizons tant dans le domaine de la formation, que dans les entreprises. De plus, la génération actuelle est plus apte à travailler dans le domaine du numérique qui fait partie de leur vie quotidienne.

Article 14. Conductivité thermique des corps poreux en fonction de granulométrie et taux de compactage application sur le briquette de charbon a base de biomasse approche analytique et expérimentale

RATRIMOARISONINA Hasina Andriatahina ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Institut Supérieur de Technologie d'Antananarivo

rahasinaa@gmail.com

RESUME

Cette étude propose une étude des phénomènes de conductivité thermique dans le corps poreux en fonction de granulométrie et le taux de compression. La modèle à une température a été utilisée pour déterminer analytiquement le champ des températures après la transformation Laplace de l'équation de chaleur thermique en régime transitoire à l'échelle macroscopique puis la détermination de la transformation inverse par l'algorithme de Stehfest. Pour les deux échantillons retenus (balle de riz carbonisé et poudre de charbon), on mesure ensuite par voie expérimentale le champ de température pendant une durée de 100 s et on enregistre les valeurs à chaque 10s pour déterminer les différentes conceptions thermiques. Les résultats obtenus montrent une assez bonne adéquation avec des classifications thermiques des corps poreux dans la classe des isolant, mais présentent un écart non négligeable sur les deux approches adoptés.

MOTS-CLES : briquette de charbon, poreux, Laplace, Algorithme de Stehfest., conductivité, thermique

1. INTRODUCTION

Le comportement des matériaux granulaires est étudié depuis longtemps dans différentes sphères du domaine scientifique. En effet, plusieurs études ont été menées pour développer des modèles permettant de prédire le comportement thermique des matériaux granulaires. Différents modèles ont été développés pour diverses applications, tout dépendant des champs d'activité dans les recherches ont été menées dans le domaine de la physique, en particulier dans le domaine du génie thermique, que la plupart des modèles pouvant décrire le comportement thermique et/ou électrique du coke granulaire à l'étude ont été développés.

Les deux conditions de cette étude sont la variation de conductivité thermique en fonction des contraintes thermomécaniques qui présente certaines caractéristiques spécifiques qui ne sont pas bien connus dans les milieux granulaires et aussi en fonction de granulométrie des poudres utilisés qui est le responsable du taux de porosité de l'échantillon.

2. LE MILIEU GRANULAIRE

Le milieu granulaire (corps poreux) se compose d'une *matrice solide* et de son complément géométrique, l'*espace poreux*. L'espace poreux peut être occupé par un ou des fluides. Ainsi, les biomasses sont des milieux poreux, mais on prend par la suite de ce travail la briquette de charbon à partir des résidus agricoles. Les briquette les plus répandus est la poudre de charbon et la sciure de bois qui est très utile pour être combustible ménagère.

La première caractéristique d'un corps poreux est sa porosité : il s'agit du rapport entre le volume ne contenant pas de solide et le volume total du milieu V .

La présence de certains pores n'est pas accessible au fluide circulant, on doit donc prendre en compte une porosité apparente qui ne tient compte que des micropores accessibles et des macropores offertes au fluide (espace entre grain), on obtient alors

$$\varepsilon = \frac{V_f}{V} \quad (1)$$

où V_f : le volume de fluide

V : le volume total du milieu

La porosité totale est généralement calculée à partir de la densité apparente et de la densité réelle du matériau. La densité apparente (souvent dénommée masse volumique dans la littérature) concerne l'ensemble du sol en place, vides compris, tandis que la densité réelle (ou densité de solide) représente la masse volumique de la matière solide du sol, pores exclus.

La porosité totale comprend en fait :

- **la macroporosité** (pores grossiers remplis d'air), formée des vides $> 50 \mu\text{m}$ occupés par l'air après ressuyage du sol (élimination de l'eau de gravité) ;
- **la méso porosité** (porosité capillaire), formée des vides de 0.2 à $50 \mu\text{m}$ qui retiennent l'eau utile aux plantes (eau utilisable);
- **la microporosité**, formée des pores les plus fins ($< 0.2 \mu\text{m}$), dans lesquels se fait la rétention de l'eau indisponible pour les plantes (eau inutilisable).

La macroporosité dépend fortement de la structure du corps alors que la mésoporosité est essentiellement influencée par la texture.

La porosité représente un paramètre physique très déterminant pour les propriétés thermophysiques au niveau macroscopique. Celle-ci peut être calculée à partir de la formule suivante :

$$\varepsilon = \frac{\text{volume du vide}}{\text{volume total}} = 1 - \frac{\rho_{app}}{\rho_{gr}} \quad (2)$$

ρ_{app} : masse volumique apparente de l'échantillon

ρ_{gr} : masse volumique absolue du grain

3. TRANSFERT THERMIQUE DANS LE MILIEU GRANULAIRE

Pour comprendre les mécanismes du transfert thermique dans un matériau poreux (brique de charbon), nous allons nous intéresser à des différents phénomènes de transferts thermiques mis en jeu de pyrolyse et/ou combustion de biomasse dans un lit fixe. Le transfert thermique à travers un lit fixe de biomasse est dû à la contribution des trois mécanismes : conduction dans la phase solide représenté par la fine de biomasse, conduction de la phase gazeuse (l'air en l'occurrence) et rayonnement.

Selon Hobbs et al. Différents phénomènes de transferts thermiques sont mis en jeu dans un lit fixe (figure 1). Il s'agit de :

1. Conduction à travers une particule solide,
2. Conduction solides en contact,
3. Rayonnement solide-solide,
4. Convection solide-fluide,
5. Rayonnement solide-fluide,
6. Conduction fluide,
7. Rayonnement fluide.

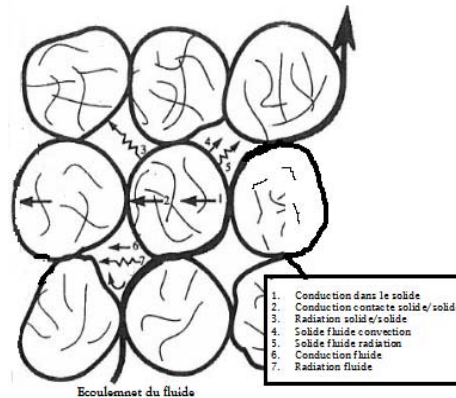


Fig 1 : transfert thermique dans le milieu poreux

3.1 Modèle mathématique des conductivités thermiques effectives

Le système considéré ici est un empilement de grains dont les pores sont saturés par de l'air (gaz interstitiel). L'air est piégé dans les pores qui sont petits, ce qui empêche la formation de courant convectifs et responsable de la suppression du transfert convectif (4) sont aussi efficace dans la réduction de la conductivité de la phase gazeuse.

La conductivité thermique effective λ_{eff} , qui est considérée comme fonction des trois composantes suivant :

- la conductivité de la phase solide, notée λ_s ;
- la conductivité de la phase gazeuse, notée λ_g ;
- la conductivité radiative, notée λ_r .

(Tsotsas et Martin 1987) $\lambda_{eff} = \lambda_s + \lambda_g + \lambda_r \quad (3)$

Dans le cas de l'hypothèse d'équilibre thermique, on utilise couramment la conductivité effective du milieu poreux. Sa détermination, qui dépend de λ_p et λ_a , n'est pas simple.

Les trois modèles de base pour déterminer λ_{eff} :

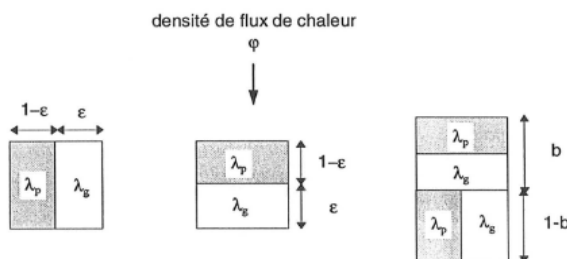


Figure2 : Représentation schématique des modèles à combinaisons de résistance (1) résistance parallèle (2) Résistance en série (3) Modèle de Krischer

4. RESOLUTION DE L'EQUATION DE CHALEUR

4.1 Modèle à une température

Ce modèle basé sur les techniques d'homogénéisation et de prise de moyenne volumique permet d'écrire les équations de conservation de l'énergie des deux phases en faisant intervenir une température unique, et en supposant l'équilibre thermique entre les phases solide et fluide soit :

$$\langle T \rangle = \langle T_f \rangle^f = \langle T_s \rangle^s \quad (4)$$

$$\text{Avec } (\rho C_p)_t = \varepsilon(\rho C_p)_f + (1 - \varepsilon)(\rho C_p)_s \quad (5)$$

4.2 Méthode de résolution analytique

Le modèle adopté est la méthode de fil chaud permettant d'estimer la conductivité par la transformation de Laplace de l'équation aux dérivées partielles ainsi la méthode de Stehfest.

Puisque le transfert de chaleur est radial alors l'équation aux dérivées partielles de la chaleur dans l'échantillon à une position quelconque (x, r) ne varie plus en fonction de x et s'écrit :

$$\frac{\partial^2 T(r, t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T(r, t)}{\partial r} = \frac{1}{a} \frac{\partial T(r, t)}{\partial t} \quad (6)$$

Avec T (r, t) : évolution de température dans l'espace et dans le temps.

Les conditions initiales et limites

$$T(r, 0) = T(0) = T$$

$$T(\infty, t) = T_i$$

$$h[T_0(t) - T(0, t)] = -\lambda \frac{\partial T(0, t)}{\partial r}$$

$$\phi_0 = mc \frac{dT_0}{dt} + hS[T_0(t) - T(0, t)]$$

En négligeant l'effet de l'inertie de la sonde, la température du fil chaud s'écrit dans l'espace de Laplace.

$$\theta(r, p) - \theta(r, 0) = \frac{\phi_0}{P} \cdot \frac{A_0 + \frac{A_0 + A_0 \cdot R_c + B_0}{Z}}{C_0 + \frac{C_0 \cdot R_c + D_0}{Z}}$$

p : Variable de Laplace

$$A_0 = 1$$

avec

$$B_0 = \frac{1}{2\pi \cdot \lambda \cdot L \cdot q \cdot r_0} \frac{I_0(q \cdot r_0)}{I_1(q \cdot r_0)} - \frac{1}{\rho \cdot c_0 \cdot \pi \cdot r_0^2 \cdot L \cdot p}$$

$$D_0 = \frac{q r_0}{2} \frac{I_0(q \cdot r_0)}{I_1(q \cdot r_0)} \quad C_0 = \rho \cdot c_0 \cdot \pi \cdot r_0^2 \cdot L \cdot p$$

$$q = \sqrt{\frac{p}{a}} \quad \frac{1}{Z} = 2\pi \cdot \lambda \cdot L \cdot q \cdot r_0 \frac{K_1(q \cdot r_0)}{K_0(q \cdot r_0)}$$

$I_0(q, r_0)$, $I_1(q, r_0)$, $K_0(q, r_0)$, $K_1(q, r_0)$ sont des fonctions de Bessel

L'algorithme de Stehfest

L'algorithme de Stehfest (1970) écrit tous les termes, composée de fonction de Bessel, sous forme de série et donne la transformée inverse de Laplace.

Pour déterminer le transformation inverse de l'équation de Laplace du champ des températures nous utilisons l'algorithme suivant :

$$T(t) = \frac{\ln(2)}{t} \sum_{i=1}^N V_i \cdot \theta \left(\frac{\ln(2)}{t} \right) \quad (7)$$

Avec N pair et

$$V_i = (-1)^{\frac{N}{2} + i} \sum_{k=\lfloor \frac{i+1}{2} \rfloor}^{\min(i, \frac{N}{2})} \frac{k^{\frac{N}{2}} (2k)!}{(\frac{N}{2} - k)! k! (k - 1)! (i - k)! (2k - i)!} \quad (8)$$

Un nombre de terme N=10 est suffisant pour obtenir la précision satisfaisante (Bal H. 2011)

5. LES EXPERIENCES

5.1 Caractéristiques des briquettes de charbons

Procédé de fabrication de la briquette de charbon

Les procédés de fabrication de la briquette sont nombreux mais celui que nous avons utilisé est présenté dans les paragraphes suivants.

5.1.1. Préparation du liant

Pour assurer l'adhésion entre les particules de charbon de sciures de bambou et la solidité des briquettes combustibles, un liant a été ajouté. Dans cette étude, la fécule de manioc a été choisie comme liant.

Nous avons versé une quantité d'eau bien définie dans le réacteur en chauffant progressivement jusqu'à ce que la température atteigne 70°C puis nous y avons ajouté une quantité suffisante de féculés de manioc. Après agitation, nous observons la formation d'une solution très visqueuse qui est l'empois d'amidon dans le milieu réactionnel et après refroidissement l'ajout d'hydroxyde de sodium rend la solution moins visqueuse. Une fois que la solution désirée sera obtenue, nous la mélangeons avec des pâtes de déchets cellulósiques jusqu'à une formation de ouate de cellulose et nous avons obtenu le liant amélioré à base de féculés de manioc.

5.1.2. Mélangeage matière carbonisé avec son liant

Durant notre expérience au laboratoire pour le mélange de ces constituants (poudre de balle de riz carbonisé, poudre de charbon et liant), nous avons utilisé une cuvette pour faire le mélange ; et les liants préalablement préparés sont versés en premier lieu dans cette cuvette avec dosage bien défini suivi d'une agitation manuelle lente à l'aide d'une spatule en bois dont l'action est de rendre le mélange homogène puis les poudres carbonisées de proportions connues sont versées en second lieu. En tenant compte que l'eau apportée par les liants est suffisant pour bien mélanger l'ensemble.

5.1.4. Compactage

C'est une technique assurant la densification du matériau par la force obtenue à l'aide des outils ou des machines perfectionnées qui rend les matériaux beaucoup plus résistants.

Durant notre expérience on réalise des échantillons suivant des compactages pour avoir les densités suivants 650kg/m³ et de 450kg/m³.

5.1.5. Séchage

Le séchage est fait à l'atmosphère avec une température moyenne de 19°C pendant 3 jours jusqu'à ce que la variation de la masse des échantillons est inférieure à

5.2. Caractéristique des échantillons

Les caractéristiques des échantillons mesuré sont regroupée dans le tableau suivant

| | ρ [kg/m ³] | Grain [mm] | Porosité ϵ [%] | Diamètre [mm] | Longueur [mm] | C [J/kg°C] |
|---------------|--------------------------------|---------------|----------------------------|------------------|------------------|---------------|
| Echantillon 1 | 650 | 0,063 | 40 | 30 | 50 | 21 378 |
| Echantillon 2 | 650 | 0,25 | 53 | 30 | 50 | |
| Echantillon 3 | 450 | 0,063 | 32 | 30 | 50 | 35 615 |
| Echantillon 4 | 450 | 0,25 | 41 | 30 | 50 | |

Tableau1 : caractéristiques des échantillons utilisés

5.3. MESURES DES EXPERIENCES

La disposition de mesure du gradient température au sein de la briquette

Ces échantillons sont mesurés thermiquement à « échelle laboratoire » avec un thermomètre numérique RS 1384 chacun comportent quatre thermocouples de type K de 0,5 millimètre de diamètre pendant 100s avec un pas de 10s.

L'objectif de ces mesures est de tracer le profil des températures d'un échantillon cylindrique de longueur 50 mm et de 30 mm de diamètre.

Les quatre thermocouples sont placés à différentes distance par rapport à l'axe où la résistance filaire chauffante se place.

Le chauffage des échantillons est réalisé par un résistance chauffante de 5w dont son diamètre est de 3mm.

5.4. RESULTATS

Pour ces travaux le balle de riz carbonisé et le débris de charbon de bois (eucalyptus) sont retenues matières premières de l'expérience.

Les échantillons sont constitués par de gains des matières première compactés dont le diamètre de grain et le taux de compactage (porosité) seront des variables et est sollicité en compression monoaxiale parallèle à l'axe du cylindre.

Les valeurs de conductivité thermique des échantillons par expérience et par la résolution de l'équation sont données par les pentes des courbes de température quand cette variation devient négligeable.

Les valeurs des températures des échantillons de masse volumique 450 kg/m^3 et 650 kg/m^3 avec des granulométrie $0,063$ et $0,25\text{mm}$ sont consignées dans les deux tableaux ci-dessous.

| TEMPS | ANALYTIQUE granulo,063mm 450kg/m ³ | ANALYTIQUE granulo 0,25mm 450kg/m ³ | EXPERIENCE granulo,25mm 450kg/m ³ | EXPERIENCE granulo 0,063mm 450kg/m ³ |
|-------|---|--|--|---|
| 0 | 0,85 | 0,98 | 0,88 | 0,88 |
| 10 | 0,88 | 1,01 | 0,88 | 1,14 |
| 20 | 4,75 | 5,46 | 5,71 | 8,57 |
| 30 | 14,42 | 16,58 | 17,85 | 16,66 |
| 40 | 20 | 23 | 21,75 | 20 |
| 50 | 21,14 | 24,31 | 22,29 | 22,3 |
| 60 | 21,42 | 25,27 | 24 | 22,85 |
| 70 | 29,14 | 33,67 | 24,57 | 25,71 |
| 80 | 29,14 | 38,95 | 24,51 | 36,7 |
| 90 | 29,14 | 38,95 | 24 | 37,5 |
| 100 | 29 | 38,95 | 24 | 37,5 |

Tableaux : température de l'échantillon de masse volumique 450 kg/m^3

| TEMPS | ANALYTIQUE granulo 0,063mm 650kg/m ³ | ANALYTIQUE granulo 0,25mm 650kg/m ³ | EXPERIENCE granulo 0,063mm 650kg/m ³ | EXPERIENCE granulo 0,25mm 650kg/m ³ |
|-------|---|--|---|--|
| 0 | 1,5 | 1,8 | 1,5 | 1,5 |
| 10 | 1,54 | 1,848 | 1,54 | 2 |
| 20 | 8 | 9,6 | 10 | 15 |
| 30 | 20 | 24 | 25 | 30 |
| 40 | 35 | 42 | 38 | 36 |
| 50 | 36 | 43,2 | 39 | 39 |
| 60 | 36,7 | 44,04 | 42 | 40 |
| 70 | 37,2 | 44,64 | 43 | 45 |
| 80 | 37,5 | 45 | 42,9 | 48 |
| 90 | 38 | 46 | 42 | 48 |
| 100 | 38 | 46 | 42 | 48 |

Et Tableau 3 : température de l'échantillon de masse volumique 650 kg/m^3

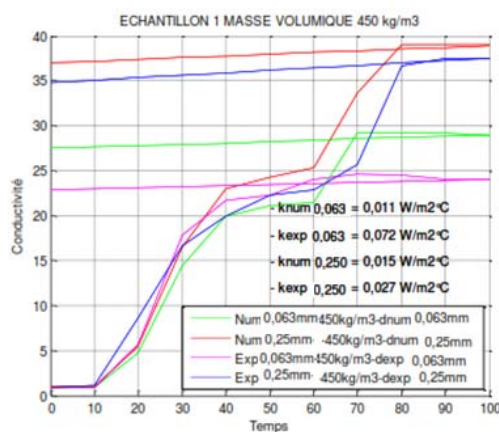


Fig3 : température pour le briquette de 450kg/m^3

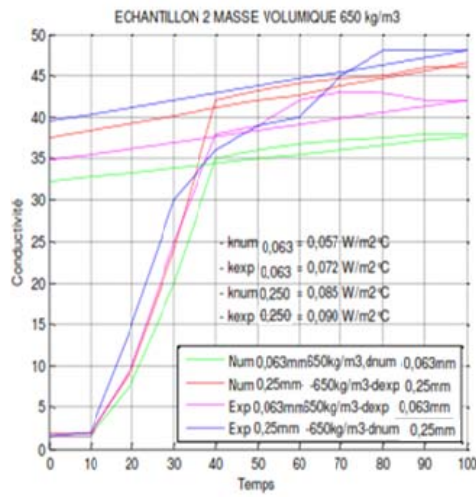


Fig4 : température pour le briquette de 650kg/m³

D'après ces diagrammes ci-dessus on constate une valeur analytique des conductivité thermique inférieur à celle des expériences sauf dans le cas l'échantillon de masse volumique 650kg/m³ et de granulométrie 0,025mm.

Par contre tous les conductivités thermiques se trouvent dans le domaine de corps isolant.

Si on considère un ratio entre les valeurs expérimentales et analytiques on constate une valeur irrégulière dans tous les cas. Ces différences sont dues aux conditions d'expérience suite aux difficultés durant la mise en place des thermocouples lors des mesures de température.

Quand on compare les valeurs des conductivités selon la granulométrie on constate que la valeur de la conductivité est inversement proportionnelle à la granulométrie, c'est-à-dire que le taux de porosité est plus important quand le diamètre des particules est grand.

6. CONCLUSIONS

Cette étude nous a permis de mieux comprendre les transferts thermiques au sein du matériau poreux en fonction de la granulométrie et taux de compression (porosité). Nous avons pu déterminer la conductivité thermique par voies analytique par la transformé inverse de Laplace et expérimentale par la mesure du champ de température. Cette conductivité est inversement proportionnelle à la taille du grain qui constitue l'échantillon et proportionnelle au taux de compression. Dans la suite de ce travail l'objectif est de vérifier ce résultat par la méthode des éléments fini et sur la code COMSOL.

Références

- [1] A.V IANOU « Etude de la méthode du régime régulier pour la mesure de la diffusivité thermique des matériaux faiblement conducteurs de la chaleur », Thèse de Doctorat de l'Université d'Evry, Janvier 1999, France.
- [2] BRAYMAND S., GRANDGEORGE J.D., Mise au point d'une méthode expérimentale de mesure de la conductivité thermique : application aux bétons de granulats recyclés, Congrès matériaux 2010, Nantes, 18-22 oct 2010.
- [3] CARRE P., LE GALL R., "Définition et détermination des conductivités thermiques dans les structures multicouches C.V.R. – balsa", Revue générale de thermique, vol. 340, 1990.
- [4] DE PONTE F., KLARSFELD S., « Conductivité thermique des isolants », R2930, 2002, 24p.
- [5] Davis B ; Martin B. Numerical inversion of Laplace transform: a survey and comparison of Methods, Computational physics, 33 1979
- [6] Huddleston T., Byrne P., Numerical Inversion of Laplace Transforms, University South Alabama 1999.
- [7] KAEMMERLEN Aurélie, « Transfert de chaleur à travers les isolants thermiques du bâtiment » Thèse de doctorat, LEMTA, Nancy Université, 2009.
- [8] P.S. d. Laplace, Traité de mécanique céleste, Gauthier-Villars, 1806, pp. 349–501
- [9] Wang M., Pan N., Modeling and prediction of the effective thermal conductivity of random open-cell porous foams, *Int. J. Heat Mass Transfer*, (2008).