



**MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR  
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE «Abbès LAGHROUR» DE KHENCHELA  
FACULTE DES SCIENCES ET DE TECHNOLOGIE**



**Département de Génie Mécanique**

N° de série :.....

## **Mémoire de fin d'études**

*Pour l'obtention du diplôme de Master (L.M.D)*

**Spécialité : Génie Mécanique**

**Option : Construction mécanique**

# **Simulation Numérique Des Echanges De Chaleur Et De Masse Au Sein Des Mousses Métalliques Utilisant le Logiciel COMSOL 4.3**

*Réalisé par : - Rechachi Assia  
- Baali Mohamed Elbachir*

*Dirigé par : Dr. Boulahrouz Salim*

*Membres de jury :*

- Abboudi Abdalaziz MCB. Président
- Allaoui Abdel Halim MAA Examineur

*Présenté le 20/06/2018*

# Remerciements

*En tout premier lieu, je remercie le bon Dieu, tout puissant, de m'avoir donné la force pour survivre, ainsi que l'audace pour dépasser toutes les difficultés.*

*Nous adressons le grand remerciement à notre encadreur qui a proposé le thème de ce Mémoire, pour ses conseils et ses dirigés du début à la fin de ce travail.*

*Nous tenons également à remercier messieurs les membres de jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant de siéger à notre soutenance, tout particulièrement :*

*Mr Abboudi Abdalaziz pour nous avoir fait l'honneur de présider le jury de cette mémoire.*

*Nous souhaitons exprimer notre gratitude à Mr. Allaoui Abdel Halim pour avoir fait de lecteur notre mémoire, aller l'examiner et il peuvent évaluer cette mémoire. Nous vous remercions pour l'intérêt que vous avez porté à ce travail et pour vos précieux conseils et remarques.*

*Finalement, nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à nos familles qui nous ont toujours soutenues et à tout ce qui participe de réaliser ce mémoire. Ainsi que l'ensemble des enseignants qui ont contribué à notre formation.*

## *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail*

*A mes parents, mes estimes pour eux sont immenses, je vous remercie pour tout ce que vous avez fait pour moi.*

*Que dieu vous préserve une longue vie heureuse. A mes très chère frères TareQ et Walid*

*A qui je souhaite une vie pleine de bonheur, de prospérité et de réussite. A mon binôme ASSIA.*

*A tous mes amis : Madjed, Hatem, Youssef, Yacine, Zohir, Khamissi, Taher, Akram, Walid, Nasro, Aymen, Yasser, Hicham, Raid, Youssef hora, Didine, Ihab, Salah, Hamza, Achraf, Amine, Ramzi, Mani, Isslam, Mohamed.*

*Je vous dédie ce travail et vous souhaite un avenir à la hauteur de vos ambitions. Que notre amitié dure*

*A Toute ma famille, Tous ceux que j'aime, qui m'aiment et me comblez de conseils*

*A tous ceux qui, un jour, ont pensé à moi, les plus beaux mots ne sauraient exprimer ma redevance.*

*Med baali*

# Dédicace

*Ce travail est dédié à mon père Lhaj Mebarek, décédé trop tôt, qui m'a toujours poussé et motivé dans mes études. J'espère que, du monde qui est sien maintenant, il apprécie cet humble geste comme preuve de reconnaissance de la part d'une fille qui a toujours prié pour le salut de son âme. Puisse Dieu, le tout puissant, l'avoir en sa sainte miséricorde !*

*Il est naturel que ma pensée la plus forte aille vers ma mère, à qui je dois la vie et une part essentielle de ma personnalité. Qu'elle sache que l'amour qu'elle me donne continue à m'animer et me permet d'envisager l'avenir comme un défi.*

*Que dieu vous préserve une longue vie heureuse. A ma chère sœur Hanan et mes chères frères Imad Eddin , Karim , Kamel et Abdelmalek*

*A qui je souhaite une vie pleine de bonheur, de prospérité et de réussite. A mon binôme Med Elbachir.*

*A tous mes amis :Noussaiba , Widad, fahima ,Wassila , Layla ,Hatem .*

*Je vous dédie ce travail et vous souhaite un avenir à la hauteur de vos ambitions. Que notre amitié dure*

*A Toute ma famille, Tous ceux que j'aime, qui m'aiment et me comblent de conseils*

*A tous ceux qui, un jour, ont pensé à moi, les plus beaux mots ne sauraient exprimer ma redevance.*

*Assia Rechachi*

# Table des matières

<b>Introduction générale.....</b>	<b>1</b>
Nomenclature.....	3
<b>Chapitre I : Généralités sur les mousses métalliques.....</b>	<b>5</b>
I.1 Revue bibliographique.....	5
I.2 Le matériau mousse métallique.....	6
I.2.1 Propriétés géométriques des mousses métallique.....	8
a) La porosité.....	8
b) Diamètre de pore.....	8
c) Surface spécifique.....	8
I.3 Procédés de fabrication des mousses métalliques.....	8
a) Voie gazeuse.....	9
b) Voie liquide.....	9
c) Voie solide.....	9
I.4 Domaines d'application des mousses métalliques.....	10
a) Echangeur de chaleur.....	10
b) Construction automobile.....	11
c) Applications biomédicales.....	12
d) Purification de l'eau.....	12
e) Electrode poreuse.....	13
<b>Chapitre II : Modélisation mathématique.....</b>	<b>14</b>
II.1 Modèle d'écoulement dans les milieux poreux.....	14
II.2 Transfert thermique dans un milieu poreux.....	15
II.3 Transfert de matière dans un milieu poreux.....	16
II.4 La combinaison du transfert thermique et de matière.....	16
II.5 Description du problème.....	16

II.6 La géométrie du problème.....	17
II.7 Hypothèses simplificatrices.....	17
II.8 Formulation mathématique.....	18
II.8.1 L'équation de continuité.....	18
II.8.2 L'équation de la quantité de mouvement suivant x.....	18
II.8.3 L'équation de la quantité de mouvement suivant y.....	18
II.8.4 L'équation d'énergie.....	18
II.9 Les conditions initiales aux limites.....	18
II.10 l'adimensionalisation des variables.....	19
II.11 L'adimensionnalisation des équations.....	19
II.11.1 Les paramètres de contrôle.....	19
II.11.2. L'équation de continuité.....	20
II.11.3. L'équation de la quantité de mouvement suivant x.....	20
II.11.4 L'équation de la quantité de mouvement suivant y.....	20
II.11.5 L'équation d'énergie.....	20
II.11.6. L'équation de masse.....	20
<b>Chapitre III: Résultats de la simulation CFD en 2D transitoire par le logiciel COMSOL4.3..21</b>	
III.1 Introduction.....	21
III.2 Géométrie du système simulé.....	22
III.3 Maillage du système simulé.....	22
III.4 consistance du maillage.....	23
III.5 Résultats de la simulation thermohydraulique.....	24
III.5.1 Températures pour : $q_{\text{source}}=150 \text{ W}$ , $u_0 =20 \text{ cm/s}$ et $t= 3600 \text{ s}$ .....	24
III.5.2 Vitesses pour : $q_{\text{source}}=150 \text{ W}$ , $u_0 =20 \text{ cm/s}$ et $t= 3600 \text{ s}$ .....	25
III.5.3 Températures pour : $q_{\text{source}}=150 \text{ W}$ , $u_0 =30 \text{ cm/s}$ et $t= 3600 \text{ s}$ .....	27
III.5.4 Vitesses pour : $q_{\text{source}}=150 \text{ W}$ , $u_0 =30 \text{ cm/s}$ et $t= 3600 \text{ s}$ .....	28
III.5.5 Températures pour : $q_{\text{source}}=150 \text{ W}$ , $u_0 =50 \text{ cm/s}$ et $t= 3600 \text{ s}$ .....	30

III.5.6 Vitesses pour : $q_{\text{source}}=150 \text{ W}$ , $u_0 =50 \text{ cm/s}$ et $t= 3600 \text{ s}$ .....	31
III.5.7 Températures pour : $q_{\text{source}}=150 \text{ W}$ , $u_0 =70 \text{ cm/s}$ et $t= 3600 \text{ s}$ .....	32
III.5.8 Vitesses pour : $q_{\text{source}}=150 \text{ W}$ , $u_0 =70 \text{ cm/s}$ et $t= 3600 \text{ s}$ .....	33
III.5.9 Températures pour : $q_{\text{source}}=180 \text{ W}$ , $u_0 =20 \text{ cm/s}$ et $t= 3600 \text{ s}$ .....	35
III.5.10 Vitesses pour : $q_{\text{source}}=180 \text{ W}$ , $u_0 =20 \text{ cm/s}$ et $t= 3600 \text{ s}$ .....	36
III.5.11 Températures pour : $q_{\text{source}}=180 \text{ W}$ , $u_0 =30 \text{ cm/s}$ et $t= 3600 \text{ s}$ .....	37
III.5.12 Vitesses pour : $q_{\text{source}}=180 \text{ W}$ , $u_0 =30 \text{ cm/s}$ et $t= 3600 \text{ s}$ .....	39
III.5.13 Températures pour : $q_{\text{source}}=180 \text{ W}$ , $u_0 =50 \text{ cm/s}$ et $t= 3600 \text{ s}$ .....	40
III.5.14 Vitesses pour : $q_{\text{source}}=180 \text{ W}$ , $u_0 =50 \text{ cm/s}$ et $t= 3600 \text{ s}$ .....	42
III.5.15 Températures pour : $q_{\text{source}}=180 \text{ W}$ , $u_0 =70 \text{ cm/s}$ et $t= 3600 \text{ s}$ .....	43
III.5.16 Vitesses pour : $q_{\text{source}}=180 \text{ W}$ , $u_0 =70 \text{ cm/s}$ et $t= 3600 \text{ s}$ .....	44
III.5.17 Températures pour : $q_{\text{source}}=200 \text{ W}$ , $u_0 =20 \text{ cm/s}$ et $t= 3600 \text{ s}$ .....	47
III.5.18 Vitesses pour : $q_{\text{source}}=200 \text{ W}$ , $u_0 =20 \text{ cm/s}$ et $t= 3600 \text{ s}$ .....	48
III.5.19 Températures pour : $q_{\text{source}}=200 \text{ W}$ , $u_0 =30 \text{ cm/s}$ et $t= 3600 \text{ s}$ .....	49
III.5.20 Vitesses pour : $q_{\text{source}}=200 \text{ W}$ , $u_0 =30 \text{ cm/s}$ et $t= 3600 \text{ s}$ .....	51
III.5.21 Températures pour : $q_{\text{source}}=200 \text{ W}$ , $u_0 =50 \text{ cm/s}$ et $t= 3600 \text{ s}$ .....	52
III.5.22 Vitesses pour : $q_{\text{source}}=200 \text{ W}$ , $u_0 =50 \text{ cm/s}$ et $t= 3600 \text{ s}$ .....	53
III.5.23 Températures pour : $q_{\text{source}}=200 \text{ W}$ , $u_0 =70 \text{ cm/s}$ et $t= 3600 \text{ s}$ .....	54
III.5.24 Vitesses pour : $q_{\text{source}}=200 \text{ W}$ , $u_0 =70 \text{ cm/s}$ et $t= 3600 \text{ s}$ .....	56
III.5.25 Températures pour : $q_{\text{source}}=220 \text{ W}$ , $u_0 =20 \text{ cm/s}$ et $t= 3600 \text{ s}$ .....	57
III.5.26 Vitesses pour : $q_{\text{source}}=220 \text{ W}$ , $u_0 =20 \text{ cm/s}$ et $t= 3600 \text{ s}$ .....	58
III.5.27 Températures pour : $q_{\text{source}}=220 \text{ W}$ , $u_0 =30 \text{ cm/s}$ et $t= 3600 \text{ s}$ .....	60
III.5.28 Vitesses pour : $q_{\text{source}}=220 \text{ W}$ , $u_0 =30 \text{ cm/s}$ et $t= 3600 \text{ s}$ .....	61
III.5.29 Températures pour : $q_{\text{source}}=220 \text{ W}$ , $u_0 =50 \text{ cm/s}$ et $t= 3600 \text{ s}$ .....	62
III.5.30 Vitesses pour : $q_{\text{source}}=220 \text{ W}$ , $u_0 =50 \text{ cm/s}$ et $t= 3600 \text{ s}$ .....	63
III.5.31 Températures pour : $q_{\text{source}}=220 \text{ W}$ , $u_0 =70 \text{ cm/s}$ et $t= 3600 \text{ s}$ .....	65
III.5.32 Vitesses pour : $q_{\text{source}}=220 \text{ W}$ , $u_0 =70 \text{ cm/s}$ et $t= 3600 \text{ s}$ .....	66

III.6 Conclusion.....	67
<b>Chapitre IV: Résultats de la simulation CFD en 3D transitoire par le logiciel COMSOL4.3..</b>	<b>69</b>
IV.1 Introduction.....	69
IV.2 Géométrie du système simulé.....	70
IV.3 Maillage du système simulé.....	70
IV.4 Résultats de la simulation au sein du canal.....	71
IV.4.1 Températures pour : $q_{source}=1.25 \text{ MW/m}^3$ et $u_0 =30 \text{ cm/s}$ et $t=3600s$ .....	71
IV.4.2 Vitesses pour : $q_{source}=1.25\text{MW/m}^3$ et $u_0 =30 \text{ cm/s}$ et $t=3600s$ .....	72
IV.4.3 Températures pour : $q_{source}=1.25\text{MW/m}^3$ et $u_0 =50 \text{ cm/s}$ et $t=3600s$ .....	73
IV.4.4 Vitesses pour : $q_{source}=1.25\text{MW/m}^3$ et $u_0 =50 \text{ cm/s}$ et $t=3600s$ .....	75
IV.4.5 Températures pour : $q_{source}=1.25\text{MW/m}^3$ et $u_0 =70 \text{ cm/s}$ et $t=3600s$ .....	76
IV.4.6 Vitesses pour : $q_{source}=1.25\text{MW/m}^3$ et $u_0 =70 \text{ cm/s}$ et $t=3600s$ .....	78
IV.4.7 Températures pour : $q_{source}=1.5\text{MW/m}^3$ et $u_0 =30 \text{ cm/s}$ et $t=3600s$ .....	79
IV.4.8 Vitesses pour : $q_{source}=1.5\text{MW/m}^3$ et $u_0 =30 \text{ cm/s}$ et $t=3600s$ .....	80
IV.4.8 Vitesses pour : $q_{source}=1.5\text{MW/m}^3$ et $u_0 =30 \text{ cm/s}$ et $t=3600s$ .....	81
IV.4.10 Vitesses pour : $q_{source}=1.5\text{MW/m}^3$ et $u_0 =50 \text{ cm/s}$ et $t=3600s$ .....	83
IV.4.11 Températures pour : $q_{source}=1.5\text{MW/m}^3$ et $u_0 =70 \text{ cm/s}$ et $t=3600s$ .....	84
IV.4.12 Vitesses pour : $q_{source}=1.5\text{MW/m}^3$ et $u_0 =70 \text{ cm/s}$ et $t=3600s$ .....	86
IV.4.13 Températures pour : $q_{source}=1.75\text{MW/m}^3$ et $u_0 =30 \text{ cm/s}$ et $t=3600s$ .....	87
IV.4.14 Vitesses pour : $q_{source}=1.75\text{MW/m}^3$ et $u_0 =30 \text{ cm/s}$ et $t=3600s$ .....	88
IV.4.14 Vitesses pour : $q_{source}=1.75\text{MW/m}^3$ et $u_0 =30 \text{ cm/s}$ et $t=3600s$ .....	89
IV.4.16 Vitesses pour : $q_{source}=1.75\text{MW/m}^3$ et $u_0 =50 \text{ cm/s}$ et $t=3600s$ .....	91
IV.4.17 Températures pour : $q_{source}=1.75\text{MW/m}^3$ et $u_0 =70 \text{ cm/s}$ et $t=3600s$ .....	92
IV.4.18 Vitesses pour : $q_{source}=1.75\text{MW/m}^3$ et $u_0 =70 \text{ cm/s}$ et $t=3600s$ .....	94
IV.5 Conclusion.....	95
<b>Conclusion Générale.....</b>	<b>96</b>



# Liste des figures

## Chapitre I : Généralités sur les mousses métalliques

Figure I.1: Mousses métalliques d'aluminium à cellules ouvertes.....	7
Figure I.2: Mousses métalliques d'aluminium à cellules fermées.....	7
Figure I.3: Mousses métalliques d'aluminium à cellules ouvertes ordonnées.....	7
Figure I.4: Présentation d'une mousse métallique à pores ouverts.....	8
Figure I.5: Procédé de fabrication de mousse par voie gazeuse.....	9
Figure I.6: Procédé de fabrication de mousse par voie liquide.....	9
Figure I.7: Procédé de fabrication de mousse par voie solide.....	10
Figure I.8 Procédé de fabrication de mousse par voie solide.....	11
Figure I.9: Caisse de RENAULT: renforcement structural avec des mousses d'aluminium.....	12

## Chapitre II : Modélisation mathématique

Figure II.1 : Schéma du système de refroidissement simulé.....	17
--	----

## Chapitre III : Résultats de la simulation cfd en 2d transitoire par le logiciel COMSOL 4.3.

Figure III.1 : Schéma du système de refroidissement simulé.....	22
Figure III.2 : Maillage du système de refroidissement simulé.....	22
Figure III.3 : Consistance du maillage pour (a) la température par rapport à l'axe adimensionnel $Y = y / H$ , (b) la température par rapport à l'axe adimensionnel $X = x / L$ .....	23
Figure III.4 : distribution de la température en 2D pour: $q_{source}=150$ W, $u_0 =20$ cm/s et $t= 3600$ s....	25
Figure III.5 : distribution de la vitesse en 2D pour : $q_{source}=150$ W, $u_0 =20$ cm/s et $t= 3600$ s.....	27
Figure III.6 : distribution de la température en 2D pour: $q_{source}=150$ W, $u_0 =30$ cm/s et $t= 3600$ s....	28
Figure III.7 : distribution de la vitesse en 2D pour: $q_{source}=150$ W, $u_0 =30$ cm/s et $t= 3600$ s.....	29
Figure III.8 : distribution de la température en 2D pour: $q_{source}=150$ W, $u_0 =50$ cm/s et $t=3600$ s.....	31
Figure III.9: distribution de la vitesse en 2D pour: $q_{source}=150$ W, $u_0=50$ cm/s et $t=3600$ s.....	32
Figure III.10 : distribution de la température en 2D pour: $q_{source}=150$ W, $u_0=70$ cm/s et $t=3600$ s.....	33
Figure III.11 : distribution de la vitesse en 2D pour: $q_{source}=150$ W, $u_0 =70$ cm/s et $t=3600$ s.....	34
Figure III.12 : distribution de la température en 2D pour: $q_{source}=180$ W, $u_0=20$ cm/s et $t=3600$ s....	36
Figure III.13 : distribution de la vitesse en 2D pour: $q_{source}=180$ W, $u_0 =20$ cm/s et $t=3600$ s.....	37

Figure III.14 : distribution de la température en 2D pour: $q_{source}=180 \text{ W}$ , $u_0 =30 \text{ cm/s}$ et $t=3600\text{s}$ ...	39
Figure III.15 : distribution de la vitesse en 2D pour: $q_{source}=180 \text{ W}$ , $u_0 =30 \text{ cm/s}$ et $t=3600\text{s}$ .....	40
Figure III.16 : distribution de la température en 2D pour: $q_{source}=180 \text{ W}$ , $u_0 =50 \text{ cm/s}$ et $t=3600\text{s}$ ...	41
Figure III.17 : distribution de la vitesse en 2D pour: $q_{source}=180 \text{ W}$ , $u_0 =50 \text{ cm/s}$ et $t=3600\text{s}$ .....	43
Figure III.18 : distribution de la température en 2D pour: $q_{source}=180 \text{ W}$ , $u_0 =70 \text{ cm/s}$ et $t=3600\text{s}$ ...	44
Figure III.19 : distribution de la vitesse en 2D pour: $q_{source}=180 \text{ W}$ , $u_0 =70 \text{ cm/s}$ et $t=3600\text{s}$ .....	46
Figure III.20:distribution de la température en 2D pour: $q_{source}=200 \text{ W}$ , $u_0 =20 \text{ cm/s}$ et $t=3600\text{s}$ .....	48
Figure III.21: distribution de la vitesse en 2D pour: $q_{source}=200 \text{ W}$ , $u_0 =20 \text{ cm/s}$ et $t=3600\text{s}$ .....	49
Figure III.22: distribution de la température en 2D pour: $q_{source}=200 \text{ W}$ , $u_0 =30 \text{ cm/s}$ et $t=3600\text{s}$ ....	50
Figure III.23: distribution de la vitesse en 2D pour: $q_{source}=200 \text{ W}$ , $u_0 =30 \text{ cm/s}$ et $t=3600\text{s}$ .....	52
Figure III.24: distribution de la température en 2D pour: $q_{source}=200 \text{ W}$ , $u_0 =50 \text{ cm/s}$ et $t=3600\text{s}$ ....	53
Figure III.25 distribution de la vitesse en 2D pour: $q_{source}=200 \text{ W}$ , $u_0 =50 \text{ cm/s}$ et $t=3600\text{s}$ .....	54
Figure III.26:distribution de la température en 2D pour: $q_{source}=200 \text{ W}$ , $u_0 =70 \text{ cm/s}$ et $t=3600\text{s}$ .....	55
Figure III.27: distribution de la vitesse en 2D pour: $q_{source}=200 \text{ W}$ , $u_0 =70 \text{ cm/s}$ et $t=3600\text{s}$ .....	57
Figure III.28: distribution de la température en 2D pour: $q_{source}=220 \text{ W}$ , $u_0 =20 \text{ cm/s}$ et $t=3600\text{s}$ ....	58
Figure III.29: distribution de la vitesse en 2D pour: $q_{source}=220 \text{ W}$ , $u_0 =20 \text{ cm/s}$ et $t=3600\text{s}$ .....	59
Figure III.30: distribution de la température en 2D pour: $q_{source}=220 \text{ W}$ , $u_0 =30 \text{ cm/s}$ et $t=3600\text{s}$ ....	61
Figure III.31: distribution de la vitesse en 2D pour: $q_{source}=220 \text{ W}$ , $u_0 =30 \text{ cm/s}$ et $t=3600\text{s}$ .....	62
Figure III.32:distribution de la température en 2D pour: $q_{source}=220 \text{ W}$ , $u_0 =50 \text{ cm/s}$ et $t=3600\text{s}$ ....	63
Figure III.33: distribution de la vitesse en 2D pour: $q_{source}=220 \text{ W}$ , $u_0 =50 \text{ cm/s}$ et $t=3600\text{s}$ .....	64
Figure III.34: distribution de la température en 2D pour: $q_{source}=220 \text{ W}$ , $u_0 =70 \text{ cm/s}$ et $t=3600\text{s}$ ....	66
Figure III.35: distribution de la vitesse en 2D pour: $q_{source}=220 \text{ W}$ , $u_0 =70 \text{ cm/s}$ et $t=3600\text{s}$ .....	67
<b><u>Chapitre IV: Résultats de la simulation CFD en 3d transitoire par le logiciel COMSOL 4.3.</u></b>	
Figure IV.1 : Géométrie 3D du système de refroidissement étudié.....	70
Figure IV.2 : Maillage 3D du système de refroidissement étudié.....	70
Figure IV.3 :distribution de la température en 2D pour: $q_{source}=1.25 \text{ MW/m}^3$ et $u_0 =30 \text{ cm/s}$ et $t=3600\text{s}$ .....	72
Figure IV.4 : distribution de la vitesse en 3D pour: $q_{source}=1.25 \text{ MW/m}^3$ et $u_0 =30 \text{ cm/s}$ et $t=3600\text{s}$ .....	73

Figure IV.5 : distribution de températures en 3D pour : $q_{source}=1.25 \text{ MW/m}^3$ et $u_0 =50 \text{ cm/s}$ et $t=3600\text{s}$ .....	75
Figure IV.6 : distribution de la vitesse en3D pour: $q_{source}=1.25 \text{ MW/m}^3$ et $u_0=50 \text{ cm/s}$ et $t=3600\text{s}$ .....	76
Figure IV.7 : distribution de températures en 3D pour : $q_{source}=1.25 \text{ MW/m}^3$ et $u_0 =70 \text{ cm/s}$ et $t=3600\text{s}$ .....	77
Figure IV.8 : distribution de la vitesse en3D pour: $q_{source}=1.25 \text{ MW/m}^3$ et $u_0 =70 \text{ cm/s}$ et $t=3600\text{s}$ .....	78
Figure IV.9 : distribution de températures en 3D pour : $q_{source}=1.5 \text{ MW/m}^3$ et $u_0 =30 \text{ cm/s}$ et $t=3600\text{s}$ .....	80
Figure IV.10 : distribution de la vitesse en3D pour: $q_{source}=1.5 \text{ MW/m}^3$ et $u_0 =30 \text{ cm/s}$ et $t=3600\text{s}$ .....	81
Figure IV.11 : distribution de températures en 3D pour : $q_{source}=1.5 \text{ MW/m}^3$ et $u_0 =50 \text{ cm/s}$ et $t=3600\text{s}$ .....	83
Figure IV.12 : distribution de la vitesse en 3D pour : $q_{source}=1.5 \text{ MW/m}^3$ et $u_0 =50 \text{ cm/s}$ et $t=3600\text{s}$ .....	84
Figure IV.13 :distribution de températures en 3D pour : $q_{source}=1.5 \text{ MW/m}^3$ et $u_0 =70 \text{ cm/s}$ et $t=3600\text{s}$ .....	85
Figure IV.14 : distribution de la vitesse en 3D pour : $q_{source}=1.5 \text{ MW/m}^3$ et $u_0 =70 \text{ cm/s}$ et $t=3600\text{s}$ .....	86
Figure IV.15 : distribution de températures en 3D pour : $q_{source}=1.75 \text{ MW/m}^3$ et $u_0 =30 \text{ cm/s}$ et $t=3600\text{s}$ .....	88
Figure IV.16 : distribution de la vitesse en 3D pour : $q_{source}=1.75 \text{ MW/m}^3$ et $u_0 =30 \text{ cm/s}$ et $t=3600\text{s}$ .....	89
Figure IV.17distribution de températures en 3D pour : $q_{source}=1.75 \text{ MW/m}^3$ et $u_0 =50 \text{ cm/s}$ et $t=3600\text{s}$ .....	91
Figure IV.18 : distribution de la vitesse en 3D pour : $q_{source}=1.75 \text{ MW/m}^3$ et $u_0=50 \text{ cm/s}$ et $t=3600\text{s}$ .....	92
Figure IV.19distribution de températures en 3D pour : $q_{source}=1.75 \text{ MW/m}^3$ et $u_0 =70 \text{ cm/s}$ et $t=3600\text{s}$ .....	93
Figure IV.20 : distribution de la vitesse en 3D pour : $q_{source}=1.75 \text{ MW/m}^3$ et $u_0=70 \text{ cm/s}$ et $t=3600\text{s}$ .....	94



# *Introduction Générale*

Au début du XIX<sup>e</sup> siècle, les matériaux conventionnels comme l'acier ont été largement utilisés pour un large éventail d'applications, en commençant par la fabrication d'armure de protection jusqu'à la construction navale en passant par l'industrie automobile. Ces matériaux ont été choisis comme matériaux de construction de par leurs propriétés physiques intéressantes (hautes résistances mécaniques et comportement ductile). Cependant, leur inconvénient majeur est leur importante densité. Par conséquent, de nombreuses recherches sont en cours afin de développer ou de concevoir de nouveaux matériaux qui possèdent les mêmes propriétés mécaniques mais avec des densités réduites.

Afin d'optimiser le poids d'un composant, les matériaux de faible densité sont très recherchés et l'un des moyens choisis pour les concevoir a été de réduire la quantité de matière solide utilisée dans la fabrication, tout en préservant le dimensionnement géométrique de la structure. Ainsi, des matériaux de type cellulaire ont été fabriqués à partir de métaux en adaptant et en copiant la conception naturelle (liège, mousse, os...). C'est ainsi que les mousses métalliques ont été inventées. Les mousses métalliques possèdent de bonnes caractéristiques mécaniques. De nombreux tests ont également démontré qu'elles possèdent une grande capacité d'absorption d'énergie. En outre, les performances de ces matériaux peuvent être améliorées lorsqu'ils sont assemblés en sandwich avec des fibres de carbone ou d'aramide (Kevlar). Cette combinaison a conduit à la fabrication de composites avec un rapport performances mécaniques/poids très intéressant. Aujourd'hui de nombreuses recherches dans des pays tels que les États-Unis, Allemagne, le Royaume Unis, le Japon et la France sont en cours car les applications des mousses métalliques sont nombreuses, et laisse entrevoir d'importantes retombées économiques.

Dans ce mémoire, nous avons réalisé une simulation numérique par le logiciel COMSOL 4.3 en 2D et en 3D transitoire pour simuler le comportement thermohydraulique de l'air au sein d'un canal muni d'un système plaque – composant électronique refroidie par un dissipateur en mousse métallique. Le mémoire est subdivisé en quatre chapitres encadrés par cette introduction et la conclusion générale :

- Le premier chapitre est destiné à la découverte et à la présentation du matériau mousse métallique.
- Le second chapitre présente la modélisation mathématique de l'air en écoulement transitoire à travers un canal comportant une plaque-composant électronique refroidie par une mousse considérée comme un milieu poreux.
- Le troisième chapitre est consacré à la simulation 2D transitoire par le logiciel COMSOL 4.3 du système cité ci-dessus, suivi par la discussion de la consistance de maillage ainsi que les résultats obtenus.
- Le quatrième chapitre décrit d'une façon détaillée la simulation 3D transitoire par le logiciel COMSOL 4.3, suivi par une analyse et discussion des résultats obtenus.

# Chapitre I

## Généralités sur les mousses métalliques

- I.1 Revue bibliographique
- I.2 La matériau mousse métallique
- I.3 Procédés de fabrication des mousses métalliques
- I.4 Domaines d'application des mousses métalliques

---

---

### Résumé :

**D**ans ce chapitre, nous allons dans un premier temps présenter une revue bibliographique sur les mousses métalliques et leurs procédés de fabrications. Ensuite, nous étudierons les propriétés de ces différentes mousses. Enfin nous terminerons en passant en revue les principales applications.

---

### I.1 Revue bibliographique

L'utilisation des mousses métalliques à pores ouverts ont été largement utilisées par ses diverses propriétés dans divers domaines, notamment l'aérospatiale, l'électronique et l'automobile, entre autres [1]. Ils sont une nouvelle classe relative des matériaux avec des applications très prometteuses dans lesquels il disposent de faible densité et d'autres propriétés thermiques, mécaniques, électriques et acoustiques qui font de ce matériau un excellent moyen pour améliorer les performances thermiques, mécaniques et électriques.

Les études sur les mousses métalliques ont été menées par un certain nombre de chercheurs pour des applications thermiques, certains ont été fixés sur les échangeurs de chaleur (dissipateurs de chaleur), et bien d'autres ont étudié les propriétés thermiques à base de mousses métalliques. Les propriétés de base des mousses métalliques comprennent la conductivité thermique équivalente et la perméabilité.

Antohe et al. [5] avez pour le but l'utilisation des matériaux poreux pour des applications à échangeurs de chaleur, en particulier pour développer un échangeur de chaleur composé d'une matrice microporeuse comprimée mécaniquement pour le refroidissement de systèmes de micro-ondes à haute fréquence. Il a expérimenté neuf matrices compressées à 40 PPI de densité, avec différents taux de compression pour une caractérisation hydraulique complète avec de l'air et le liquide poly-alpha d'oléfine.

Lage et Antohe [5], ont réalisé de nouvelles expériences avec 40 échantillons PPI afin de vérifier ce que d'autres auteurs ont rapporté dans la littérature comme une diminution des gradients de chute de pression au-delà du deuxième régime de Forchheimer. Ils ont constaté que, contrairement aux résultats expérimentaux avec de l'eau avec le lit tassé de sphères, que leurs résultats avec l'air et les couches de milieu poreux en aluminium ont produit une augmentation du gradient de pression statique que la vitesse a été augmentée. Ils ont comparé les données et ont constaté que le modèle cubique s'accorde mieux leur travail expérimental.

Seguin et al. [5] a fourni une caractérisation expérimentale des régimes d'écoulement pour différents échantillons poreux. Ils voulaient donner les limites du régime laminaire et a constaté que la transition vers la turbulence pour un diamètre de pore basée sur le nombre de Reynolds était de 470 qui correspond à une perméabilité en fonction du nombre de Reynolds (REK), qui est celle utilisée dans ce travail expérimental est de 0,093.

Decker et al. [5] a fourni une caractérisation expérimentale détaillée et une modélisation numérique du transfert de chaleur et les propriétés de transport de masse au sein de milieux très poreux pour les récepteurs solaires et les brûleurs poreux. Ils ont utilisé des mousses de nickel en alliage de chrome pour leur travail expérimental. Ils ont examiné la mousse en tant que pseudo-homogène, localement en volume moyenne, où la matière solide et la phase liquide ont été traités comme une seule phase artificiel avec des propriétés équivalentes. Ils ont utilisé un terme supplémentaire de chute de pression dans les équations de mouvement, qui dépendaient sur les propriétés du matériau. Ils ont montré que les modèles de lits garnis ne s'appliquent pas aux milieux à porosité élevée.

## I.2 Le matériau mousse métallique

Métal cellulaire ou poreux, mousse, ou éponge métallique : les termes sont nombreux pour désigner les différentes structures de systèmes biphasés composés d'une phase solide et d'une phase gazeuse. La phase solide est homogène et constituée du matériau de base. La phase gazeuse est présente dans des vides, des pores ou des cellules. Elle confère à la mousse une densité apparente faible par rapport à celle du matériau massif. On distingue deux types de mousses [10]:

- mousses à cellules ouvertes ou à pores interconnectés,
- mousses à cellules fermées ou à pores isolés.

Dans le cas des structures à cellules fermées, chaque cellule présente dans la mousse métallique est isolée des autres par une fine paroi de métal. Par contre, dans le cas des structures à cellules ouvertes, les cellules à proprement parler n'existent pas du fait de l'interconnexion des pores.

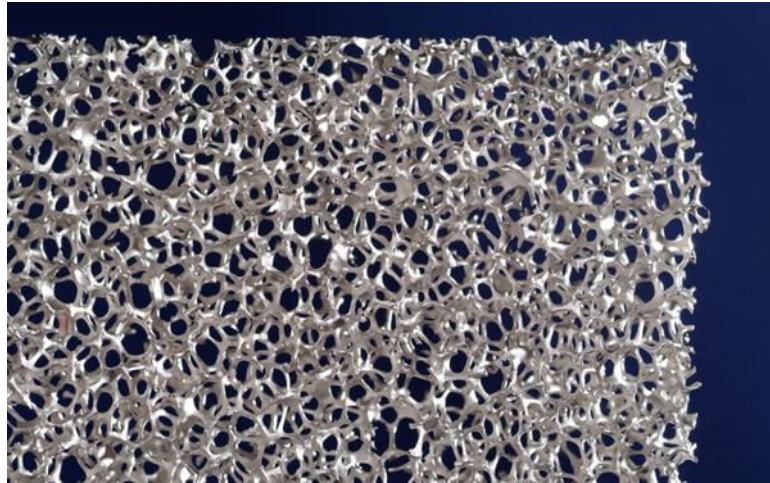


Figure I.1: Mousses métalliques d'aluminium à cellules ouvertes.

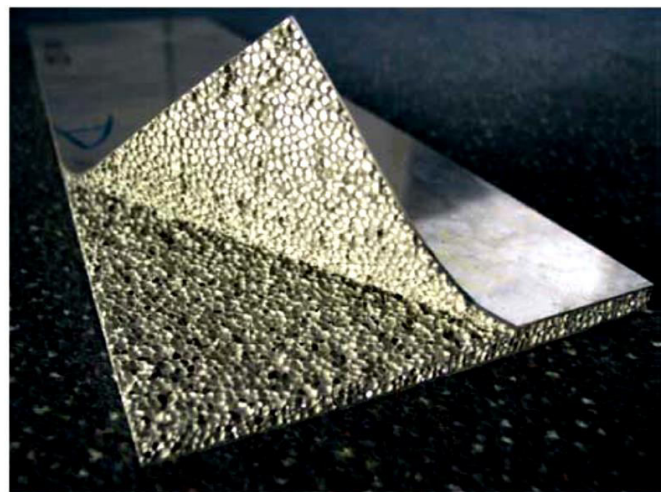
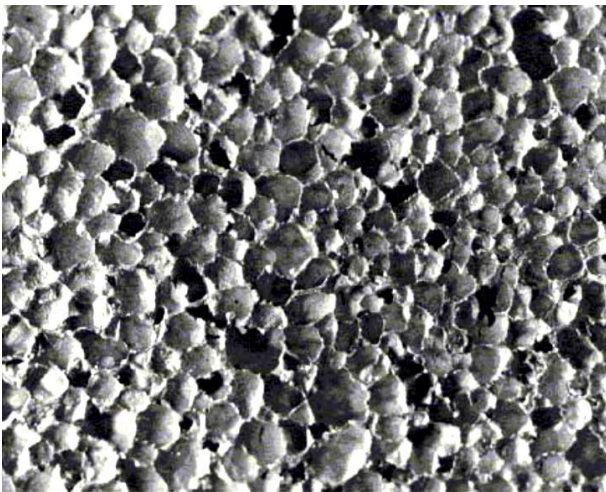


Figure I.2: Mousses métalliques d'aluminium à cellules fermées.

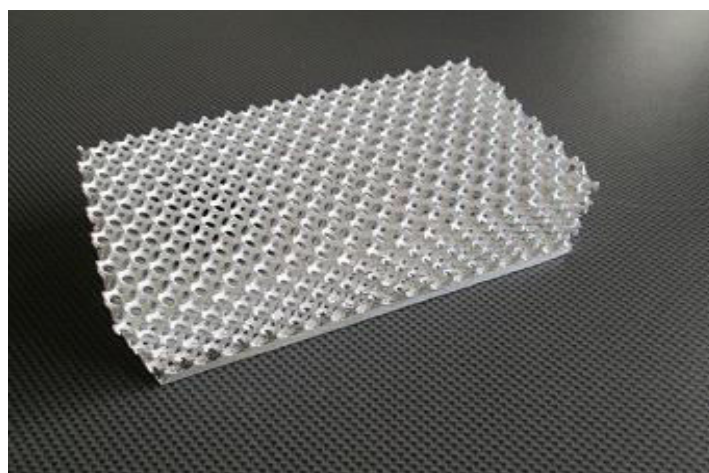


Figure I.3: Mousses métalliques d'aluminium à cellules ouvertes ordonnées.

## 1.2.1 Propriétés géométriques des mousses métalliques[1]

### a) La porosité

La porosité,  $\varepsilon$ , caractérise la propriété d'un matériau à être composé à la fois d'une phase solide et d'une phase fluide. Elle exprime le pourcentage du vide généralement occupé par l'air (phase fluide) par rapport à la matrice solide (phase solide) (figure I.4).

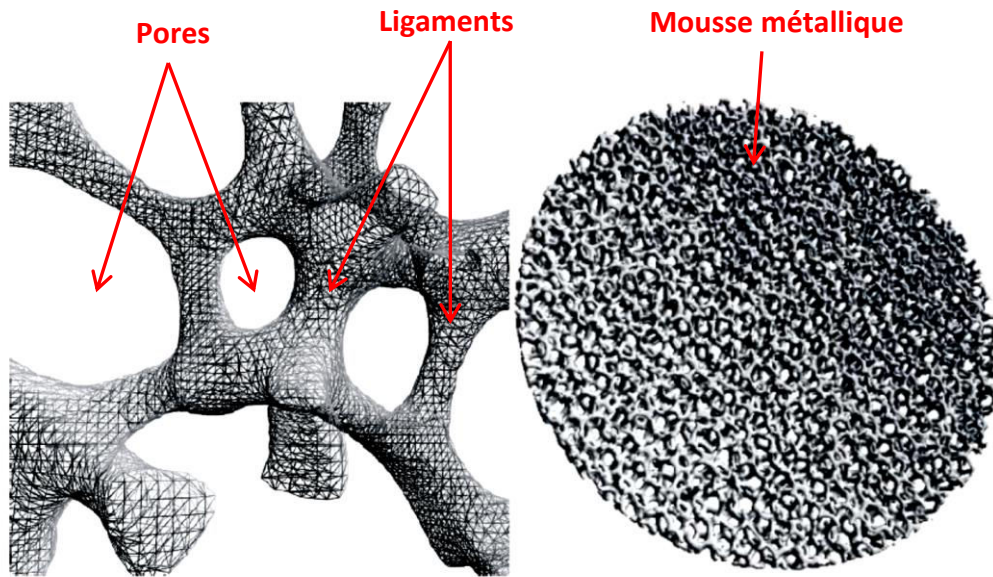


Figure I.4:Présentation d'une mousse métallique à pores ouverts.

### b) Diamètre de pore

De manière générale, le concept de « taille de pore » est extrêmement délicat à définir. Si l'observation visuelle permet de délimiter aisément les cellules, leur mesure précise nécessite la mise en place de techniques 3D spécifiques. Le diamètre du pore  $d_p$  est le diamètre moyen des cellules présentes de la mousse.

### c) Surface spécifique

La surface spécifique désigne la superficie réelle d'un objet par opposition à sa surface apparente, rapportée au volume total de l'objet.

La surface spécifique  $S_p$  correspond à la surface géométrique du solide en contact avec la porosité ouverte. Elle s'exprime en ( $m^2.m^{-3}$ ). En outre, elle correspond directement à la surface de frottement entre la phase solide et la phase fluide en écoulement. De ce point de vue, la surface spécifique apparaît comme étant un paramètre fondamental de la structure du milieu poreux lorsque l'on étudie l'aspect écoulement du matériau.

## I.3 Procédés de fabrication des mousses métalliques

La fabrication des mousses métalliques est assez empirique, et les recettes sont confidentielles. Du fait de son point de fusion assez bas ( $650^\circ C$ ), l'aluminium est l'ingrédient idéal pour fabriquer des mousses métalliques. Quant au procédé, on connaît aujourd'hui au moins trois voies de fabrication [10]:

a) **Voie gazeuse** : condensation de vapeurs métalliques avec mousses polymères, puis destruction des mousses.

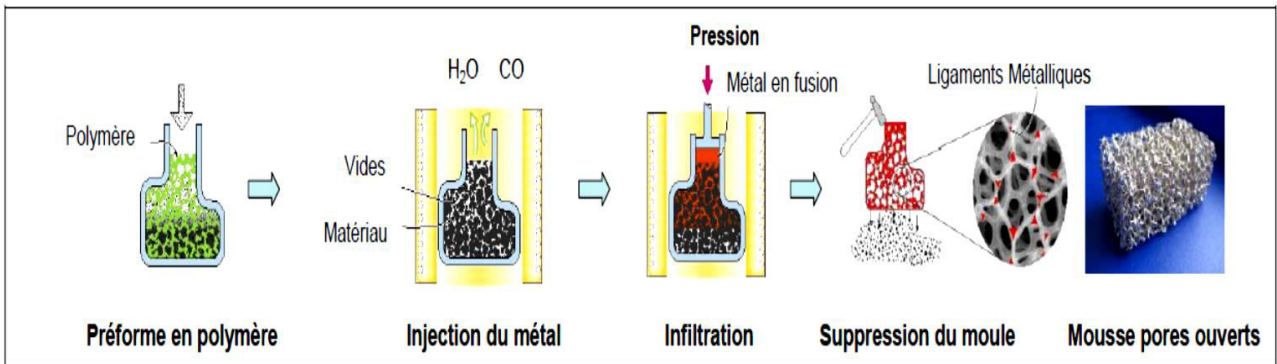


Figure I.5: Procédé de fabrication de mousse par voie gazeuse.

b) **Voie liquide** : Moulage et élimination d'une préforme : on peut par exemple fritter un mélange de poudre de sel pour s'en servir de préforme, l'infiltrer avec de l'aluminium fondu puis éliminer le sel par simple dissolution dans l'eau.

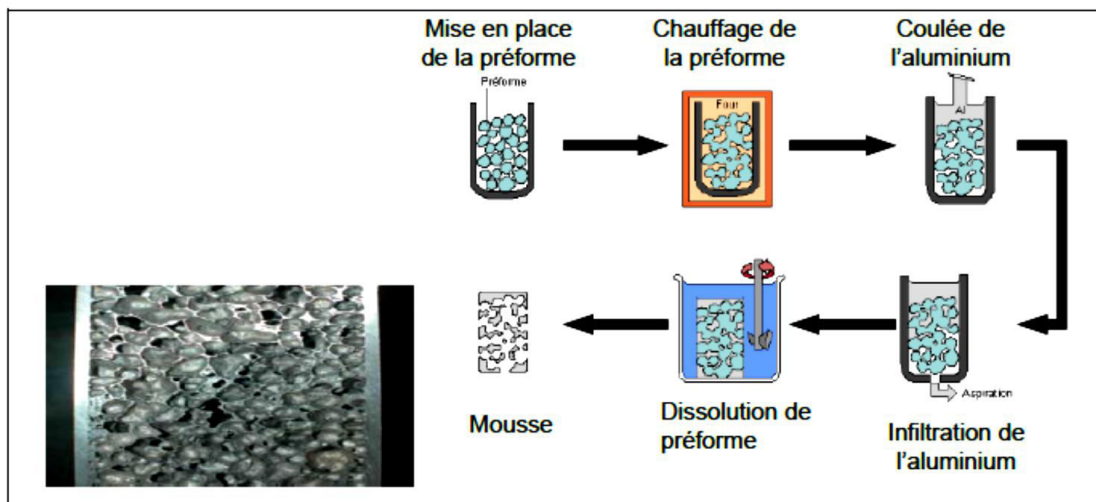


Figure I.6: Procédé de fabrication de mousse par voie liquide.

c) **Voie solide** : L'aluminium en poudre est mélangé à un agent dégageant du gaz à haute température (hydruure de titane ou de zirconium); le mélange est extrudé puis chauffé vers 600°C; l'agent gazant libère alors son hydrogène qui forme les cellules de la mousse en gonflant l'aluminium dans son état semi solide à cette température.

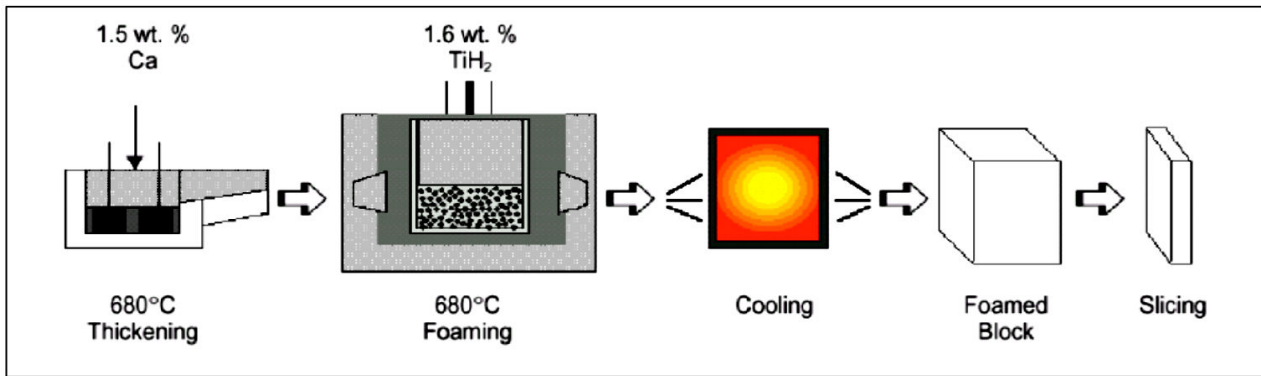


Figure I.7: Procédé de fabrication de mousse par voie solide.

Les méthodes qui utilisent le métal fondu pourraient tirer parti du système de coulée continue en métallurgie. Les technologies avec poudres, beaucoup plus chères, permettraient au contraire de produire des pièces plus complexes en plus petite série. Elle consiste à emprisonner de la poudre d'aluminium additionnée d'agent moussant entre deux tôles du même métal. L'ensemble est étiré puis mis à la forme de la pièce à réaliser. En chauffant la pièce dans un four, la réaction se déclenche et la mousse se forme in situ, produisant un véritable "sandwich". Selon les techniques et les variantes on obtiendra des pièces à porosité ouverte ou fermée.

#### I.4 Domaines d'application des mousses métalliques

Nous présentons dans cette partie quelques une des nombreuses applications où l'utilisation du matériau mousse métallique apporte une valeur ajoutée certaine aux systèmes qui l'utilisent. Compte tenu de la relative jeunesse du matériau, la recherche de secteur potentiel d'utilisation du matériau est un sujet de recherche à part entière qui contribue chaque jour à l'élargissement du champ applicatif des « mousses métalliques ». Par conséquent, la liste des applications présentées ci-dessous ne saurait être exhaustive [1].

##### a) Echangeur de chaleur

Les échangeurs compacts permettent de réduire l'encombrement, le poids et le coût des dispositifs d'échange thermique. Ils prennent une place de plus en plus importante dans tous les domaines de l'industrie et en particulier dans les secteurs de l'électronique, de l'automobile, de l'aéronautique et de la cryogénie. La conductivité thermique du métal, les propriétés de mélangeur de la structure, un rapport perte de pression / surface d'échange performant, sont autant d'atouts pour ce type d'application.

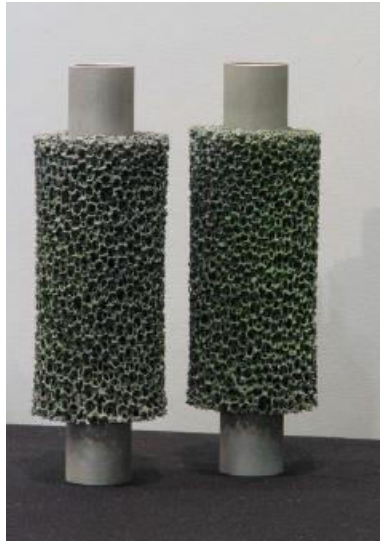


Figure I.8: Procédé de fabrication de mousse par voie solide.

### b) Construction automobile

Le poids des véhicules a tendance à augmenter sous l'effet des équipements de sécurité. En même temps on cherche à les alléger pour diminuer la consommation de carburant. L'introduction de panneaux sandwichs en mousse d'aluminium est un des moyens de concilier ces deux aspects antagonistes. Le recours à ces panneaux permet, en plus du gain de poids considérable, d'obtenir des structures avec une grande capacité d'absorption de l'énergie et une bonne résistance à la chaleur. Cette aptitude est exploitée aux points les plus susceptibles d'être accidentés pour y créer une déformation contrôlée et une dissipation optimale de l'énergie. Les mousses d'aluminium sont utilisées également dans les pare-chocs et les crash-box pour l'absorption de choc à l'avant de véhicule. Ces derniers systèmes, placés entre le pare-chocs et le châssis, sont constitués de boîtes de mousse d'aluminium à 75 % de vide qui absorbent l'énergie par écrasement en cas de choc. Une mousse d'aluminium à 95% de vide, tapissant le capot avant protégerait les piétons de chocs frontaux en cas de heurts à faible vitesse. Positionnée sous le bloc volant elle protégerait les jambes du conducteur. Sur le montant entre la vitre et le pare-brise, elle protégerait sa tête.

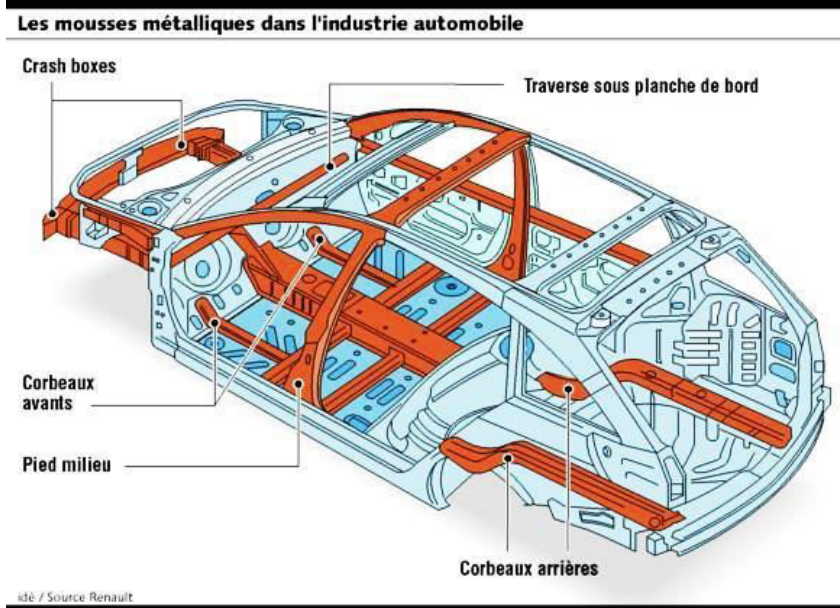


Figure I.9: Caisse de RENAULT: renforcement structural avec des mousses d'aluminium.

### c) Applications biomédicales

L'institut des matériaux industriels (IMI) a récemment développé un procédé de fabrication de mousses métalliques. La structure ouverte de ce type de matériau est particulièrement adaptée pour la fabrication d'implants ou de systèmes d'ancrage poreux.

En fait, les propriétés et structures des matériaux obtenus sont similaires à celles des os. La structure, la résistance à la corrosion, la biocompatibilité et les propriétés mécaniques de ces mousses de titane en font un matériau de choix pour la fabrication d'implants et de systèmes d'ancrage pour des applications orthopédiques et dentaires.

### d) Purification de l'eau

L'utilisation de mousses de « cuivre – argent » pour la purification de l'eau est une nouvelle voie de développement. Le contact entre liquide et les métaux peut agir contre les bactéries et les algues transportées par le fluide (par exemple les légionnelles, les streptocoques...). L'utilisation de telles mousses présente un intérêt certain sur tous les circuits d'eau qui nécessitent une qualité d'eau irréprochable : stations thermales, eau potable, tours de refroidissement...

Des essais préliminaires effectués en laboratoire prouvent que des mousses dont la phase solide est composée d'un alliage de cuivre et d'argent possèdent des caractéristiques enviabiles pour épurer l'eau en termes d'écologie, de coûts et de facilité de mise en œuvre.

### e) Electrode poreuse

L'utilisation de mousse métallique comme électrode de batterie est l'une des premières applications historiques (Ni-MH). Plus récemment, l'utilisation des électrodes en mousses métalliques a été étendue aux piles à combustibles.. L'emploi de mousses métalliques à pores ouverts, en remplacement des classiques structures à canaux, constitue une alternative prometteuse. En effet, leur porosité élevée favorise l'accès des gaz aux électrodes (surface accessible supérieure à 90% au lieu de 60 à 70% pour les canaux), autorisant a priori une utilisation optimale des surfaces catalysées. Leur emploi est également susceptible de faciliter l'intégration de certaines fonctions telles que le refroidissement (fonction échangeur de chaleur).

# Chapitre II

## Modélisation mathématique

II.1	Modèle d'écoulement dans les milieux poreux
II.2	Transfert thermique dans un milieu poreux
II.3	Transfert de matière dans un milieu poreux
II.4	La combinaison du transfert thermique et de matière
II.5	Description du problème
II.6	La géométrie du problème
II.7	Hypothèses simplificatrices
II.8	Formulation mathématique
II.9	Les conditions initiales aux limites
II.10	L'adimensionalisation des variables
II.11	L'adimensionalisation des équations
II.12	L'adimensionalisation des conditions initiales et aux limites

---

### Résumé :

**L'**Objectif de ce chapitre c'est de présenter la modélisation mathématique de l'écoulement de l'air au sein d'un canal comportant une zone libre, et une zone de dissipateur en mousse considéré comme un milieu poreux.

---

### II.1 Modèle d'écoulement dans les milieux poreux

On utilise un modèle continu d'un milieu poreux basé sur le concept du volume élémentaire représentatif pour bien décrire le bilan de quantité de mouvement d'un fluide visqueux Newtonien en milieu poreux. Le modèle est de Darcy-Forchheimer-Brinkman [2].

L'équation vectorielle de conservation de la quantité de mouvement à travers un milieu poreux s'écrit :

$$\underbrace{\rho_f \left[ \frac{1}{\varphi} \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \frac{1}{\varphi} \vec{\nabla} \cdot \left( \frac{\vec{V}\vec{V}}{\varphi} \right) \right]}_{(a)} = \underbrace{-\frac{1}{\varphi} \vec{\nabla}(\varphi P)}_{(b)} + \underbrace{\rho_f \vec{g}}_{(c)} + \underbrace{\frac{\mu}{\varphi} \nabla^2 \vec{V}}_{(d)} - \underbrace{\frac{\mu}{K} \vec{V}}_{(e)} - \underbrace{\frac{C_f \rho_f}{K^{1/2}} |\vec{V}| \vec{V}}_{(f)} \quad (\text{II.1})$$

$\vec{V}$  Une quantité moyennée à travers un volume élémentaire.

- (a) Forces inertielles macroscopiques.
- (b) Gradient de pression.
- (c) Forces de volumes.
- (d) Terme visqueux de *Brinkman*.
- (e) Terme de *Darcy*.
- (f) Terme de *Forchheimer* (Forces inertielles microscopiques).

## II.2 Transfert thermique dans un milieu poreux

On concentre sur l'équation qui exprime la première loi de la thermodynamique dans un milieu poreux isotropique ou les effets radiatifs, la dissipation visqueuse et le travail d'échange de pression sont négligeables avec un équilibre thermique local :  $T_s = T_f = T$ . On suppose aussi que la conduction dans les phases solide et fluide se produit en parallèle, et la conductivité thermique du milieu est la moyenne arithmétique des conductivités des phases solide et fluide. Dans notre cas, le milieu poreux est isotrope donc la conductivité est un scalaire [2].

Pour tout le milieu, on a l'équation d'énergie suivante :

$$(\rho c)_m \frac{\partial T}{\partial t} + (\rho c_p)_f \vec{V} \cdot \vec{\nabla} T = \vec{\nabla} \cdot (K_m \vec{\nabla} T) \quad (\text{II.2})$$

$$(\rho c_m) = (1 - \varphi)(\rho c)_s + \varphi(\rho c_p)_f \quad (\text{II.3})$$

La perméabilité équivalente du milieu (mousse métallique) est donnée par [9] :

$$K_m = 0.00073(1 - \epsilon)^{-0.224} \left(\frac{d_f}{d_p}\right)^{-1.11} d_p^2 \quad (\text{II.4})$$

Le coefficient du terme de Forchheimer est donné par [9] :

$$C_f = 0.00212(1 - \epsilon)^{-0.132} \left(\frac{d_f}{d_p}\right)^{-1.63} \quad (\text{II.5})$$

Le rapport du diamètre du ligament (fibre) par celui du pore est donné en fonction de la porosité de la mousse comme suit [9] :

$$\frac{d_f}{d_p} = 1.18 \sqrt{\frac{1-\epsilon}{3\pi} \left(\frac{1}{1-e^{(1-\epsilon)/0.04}}\right)} \quad (\text{II.6})$$

Le diamètre du port est donné en fonction de la densité de la porosité  $\omega$  par [9] :

$$d_p = \frac{0.0224}{\omega} \quad (\text{II.7})$$

### II.3 Transfert de matière dans un milieu poreux

Le terme "transfert de matière" signifie le transport de substance qui implique comme une composante (constituant, espèce,...) dans le mélange du fluide. En général, le transfert de matière est analogue à celui de la chaleur. On applique le principe de la conservation de la matière à chaque composant dans le mélange et puisque la diffusivité est un scalaire [2], on a :

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{1}{\varphi} (\vec{V} \vec{\nabla} C) = D \Delta C \quad (\text{II.8})$$

### II.4 La combinaison du transfert thermique et de matière

Dans la convection mixte bidiffusive, le couplage du transfert de chaleur et de matière est nécessaire parce que la densité du mélange de fluide dépend de la température et de la concentration. On a approximativement :

$$\rho_f(T, C) = \rho_f(T_r, C_r) [1 - \beta_T(T - T_r) - \beta_C(C - C_r)] \quad (\text{II.9})$$

Ou:

$\rho_f(T_r, C_r)$  : est la masse volumique à la température  $T_r$  et à la concentration  $C_r$ .

$\beta_C$  et  $\beta_T$  : sont présentées respectivement comme suit :

$$\beta_T = \frac{-1}{\rho} \left( \frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_{p,c} \quad (\text{II.10})$$

$$\beta_C = \frac{-1}{\rho} \left( \frac{\partial \rho}{\partial C} \right)_{p,T} \quad (\text{II.11})$$

### II.5 Description du problème

Il s'agit de l'écoulement de l'air au sein d'un canal comportant une plaque électronique muni d'un dissipateur en mousse métallique. Nous sommes intéressés par la simulation des conditions réelles de l'écoulement de l'air au sein du canal et à travers la plaque électronique et le dissipateur en mousse métallique (figure II.1). L'objectif est multiple, premièrement c'est de pouvoir déterminer sous les conditions d'un flux imposé dissipé par le composant et une vitesse de l'air connue à l'entrée du canal, le comportement thermohydraulique de notre système, et savoir la valeur de la température du composant électronique. Deuxièmement, c'est discuté les effets de l'augmentation du flux thermiques du composants, de l'augmentation de la vitesse de l'air à l'entrée, et du type de métal utilisé pour la mousse sur la phénoménologie entière du système.

## II.6 La géométrie du problème

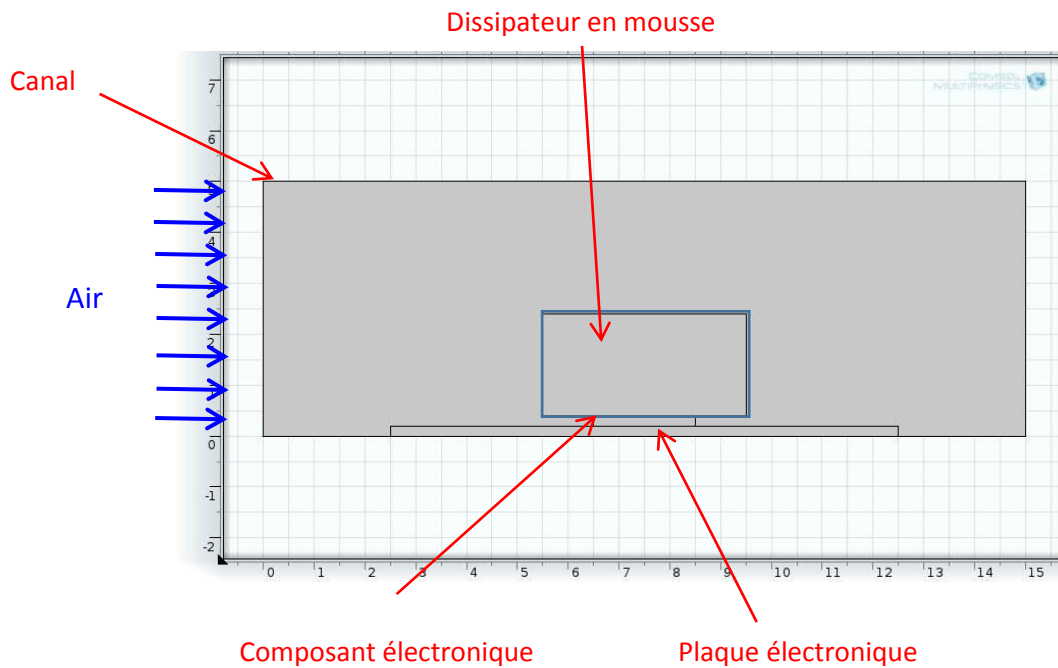


Figure II.1 : Schéma du système de refroidissement simulé.

Les dimensions de notre système sont données comme suit :

- Longueur du canal  $L = 15$  cm,
- Hauteur du canal  $H = 5$  cm,
- Longueur de la plaque électronique  $L' = 10$  cm
- Épaisseur de la plaque électronique  $H' = 0.2$  cm
- Longueur du composant électronique  $L'' = 2$  cm
- Épaisseur du composant électronique  $H'' = 0.2$  cm
- Longueur du dissipateur en mousse métallique  $L''' = 4$  cm
- Épaisseur du dissipateur en mousse métallique  $H''' = 2$  cm

## II.7 Hypothèses simplificatrices

Pour une formulation simple du modèle mathématique nous allons considérer les hypothèses suivantes :

- le milieu poreux est isotrope et homogène.
- Le fluide qui s'écoule est Newtonien, visqueux et incompressible.
- L'écoulement est laminaire.
- La dispersion thermique est négligeable.
- La dissipation visqueuse dans l'équation d'énergie est négligeable.
- Les interactions entre les transferts de chaleur et de masse connues sous le nom d'effets

Soret et Dufour respectivement sont négligeables.

- Les propriétés thermophysiques du fluide (autres que la masse volumique) sont constantes et sont évaluées à la température et à la concentration de référence. Cependant la densité du fluide dans le terme de la force de gravité varie linéairement avec la température et la concentration et elle est donnée par l'approximation de **Boussinesq**. Cette approximation est en général valable si la différence maximale de la température dimensionnelle dans le canal divisée par la température maximale dimensionnelle est inférieure à 1/3 et aussi si la différence maximale de la concentration dimensionnelle dans le canal divisée par la concentration maximale dimensionnelle est inférieure à 1/3.

## II.8 Formulation mathématique

En tenant compte de toutes les hypothèses considérées; le système d'équations locales différentielles aux dérivées partielles de conservation de continuité, du mouvement de fluide avec le transfert de chaleur et de matière dans un milieu poreux, décrivant ce problème est :

### II.8.1 L'équation de continuité

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (\text{II.12})$$

### II.8.2 L'équation de la quantité de mouvement suivant x

$$\rho_f \left[ \frac{1}{\varphi} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{\varphi^2} \frac{\partial(uu)}{\partial x} + \frac{1}{\varphi^2} \frac{\partial(vu)}{\partial y} \right] = -\frac{\partial P}{\partial x} - \frac{\mu}{k} u - c_f \frac{\rho_f \sqrt{u^2+v^2}}{\sqrt{k}} u + \frac{\mu}{\varphi} \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] \quad (\text{II.13})$$

### II.8.3 L'équation de la quantité de mouvement suivant y

$$\rho_f \left[ \frac{1}{\varphi} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{\varphi^2} \frac{\partial(uv)}{\partial x} + \frac{1}{\varphi^2} \frac{\partial(vv)}{\partial y} \right] = -\frac{\partial p}{\partial y} - \frac{\mu}{k} v - c_f \frac{\rho_f \sqrt{u^2+v^2}}{\sqrt{k}} v + \frac{\mu}{\varphi} \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right] + \rho_f g [\beta_t (T - T_1) + \beta_c (C - C_0)] \quad (\text{II.14})$$

### II.8.4 L'équation d'énergie

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial(uT)}{\partial x} + \frac{\partial(vT)}{\partial y} = \lambda \alpha \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial T}{\partial y} \right) \right] \quad (\text{II.15})$$

## II.9 Les conditions initiales aux limites

Les équations différentielles de la modélisation sont résolues avec les conditions initiales aux limites suivantes :

$$A : \quad t = 0, \quad u = v = 0, \quad T = T_0, \quad P = P_0.$$

Pour  $t > 0$ ,

$$A: \quad x = 0, y=0 \text{ et } y=H \text{ (amont du canal)} \quad u = u_0, v = 0, T = T_0, P = P_0.$$

$$A: \quad x = L, y=0 \text{ et } y=H \text{ (aval du canal), } u = u_0, v = 0, T = T_0, P = P_0.$$

$$A: \quad y = H, x=0 \text{ et } x=L \text{ (paroi supérieure du canal), } u = 0, v = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial y} = 0$$

$$A: \quad y = 0, x=0 \text{ et } x=L \text{ (paroi inférieure du canal), } u = 0, v = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial y} = 0$$

A :  $y = 0.2 \text{ cm, } x=6.5 \text{ cm et } x=8.5 \text{ cm}$  (interface composant-mousse) ,  
 $\varphi = (150\dots 220\text{W})$  flux imposé.

## II.10 l'adimensionnalisation des variables

On introduit des grandeurs de référence par rapport aux quelle toutes les variables seront normalisées. Le symbole \* désigne les quantités adimensionnelles qui sont définies comme suit :

$$x^* = x/H,$$

$$y^* = y/H,$$

$$t^* = t/(H/U_0),$$

$$U^* = u/U_0,$$

$$V^* = v/U_0,$$

$$P^* = \frac{P-P_0}{\rho_f U_0^2},$$

$$T^* = \frac{T-T_{min}}{T_{max}-T_{min}},$$

$$C^* = \frac{C-C_{min}}{C_{max}-C_{min}} = \frac{C-C_0}{C_1-C_0}.$$

## II.11 L'adimensionnalisation des équations

En introduisant les variables adimensionnelles précédentes dans le système d'équations, on obtient la version non dimensionnelle des équations utilisées. Pour la simplification d'écriture, on supprime le symbole\*. Ensuite, on utilise des paramètres de contrôle pour bien écrire ce système d'équations.

### II.11.1 Les paramètres de contrôle

Le rapport d'aspect =  $L/H$

Le nombre de Reynolds  $Re = U_0 H / \nu$ ,

Le nombre de Grashof thermique  $Gr_t = \frac{g\beta_t(T_0 - T_1)H^3}{\nu^2}$ ,

Le nombre de Grashof solutal  $Gr_c = \frac{g\beta_c(C_0 - C_1)H^3}{\nu^2}$ ,

Le nombre de Prandtl  $Pr = \frac{\nu}{\alpha}$

Le nombre de Schmidt  $Sc = \frac{\nu}{D}$ ,

Le nombre de Darcy  $Da = \frac{k}{H^2}$ ,

La porosité  $\varphi = \frac{\text{Volume des pores de milieu poreux}}{\text{Volume totale de milieu poreux}}$ .

### II.11.2. L'équation de continuité

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} = 0 \quad (\text{II.16})$$

### II.11.3. L'équation de la quantité de mouvement suivant x

$$\frac{1}{\varphi} \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{1}{\varphi^2} \frac{\partial(UU)}{\partial x} + \frac{1}{\varphi^2} \frac{\partial(VU)}{\partial y} = -\frac{\partial P}{\partial x} - \frac{U}{ReDa} - C_f \frac{\sqrt{U^2 + V^2}U}{\sqrt{Da}} + \frac{1}{Re\varphi} \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial U}{\partial y} \right) \right] \quad (\text{II.17})$$

### II.11.4 L'équation de la quantité de mouvement suivant y

$$\frac{1}{\varphi} \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{1}{\varphi^2} \frac{\partial(UV)}{\partial x} + \frac{1}{\varphi^2} \frac{\partial(VV)}{\partial y} = -\frac{\partial P}{\partial y} - \frac{V}{ReDa} - C_f \frac{\sqrt{U^2 + V^2}V}{\sqrt{Da}} + \frac{1}{Re\varphi} \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial V}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial V}{\partial y} \right) \right] + \frac{Gr_t}{Re^2} T - \frac{Gr_c}{Re^2} C \quad (\text{II.18})$$

### II.11.5 L'équation d'énergie

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial(UT)}{\partial x} + \frac{\partial(VT)}{\partial y} = \frac{1}{RePr} \frac{\partial}{\partial x} \left[ \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{1}{RePr} \frac{\partial}{\partial y} \left[ \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right] \quad (\text{II.19})$$

### II.11.6. L'équation de masse

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{1}{\varphi} \frac{\partial(UC)}{\partial x} + \frac{1}{\varphi} \frac{\partial(VC)}{\partial y} = \frac{1}{ReSc} \frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{\partial C}{\partial x} \right] + \frac{1}{ReSc} \frac{\partial}{\partial y} \left[ \frac{\partial C}{\partial y} \right] \quad (\text{II.20})$$

# Chapitre III

## RESULTATS DE LA SIMULATION CFD EN 2D TRANSITOIRE PAR LE LOGICIEL COMSOL 4.3.

III.1	Introduction
III.2	Géométrie du système simulé
III.3	Maillage du système simulé
III.4	Consistence du maillage
III.5	Résultats de la simulation thermohydraulique
III.6	Conclusion

---

### Résumé :

**L'**Objectif de ce chapitre c'est de présenter et d'analyser les résultats de simulation par le logiciel COMSOL d'un dissipateur en mousse métallique d'un système électronique de puissance.

---

### III.1 Introduction

Les mousses métalliques comme des milieux poreux et par leurs grandes surfaces d'échange avec l'air présentent des applications majeures comme des refroidisseurs dans le domaine industriel. Ces mousses jouent le rôle de dissipateurs thermiques pour les composants électroniques de puissance. Par l'augmentation de leur surface d'échange, le flux thermique absorbé par ces dissipateurs augmente, et enfin le refroidissement des composants électroniques est réalisé.

Dans ce chapitre, nous exposons les résultats de simulation par le logiciel COMSOL du modèle du chapitre trois, concernant l'écoulement de l'air au sein d'un canal comportant une plaque électronique muni d'un dissipateur en mousse métallique. Nous sommes intéressés par la simulation des conditions réelles de l'écoulement de l'air au sein d'un canal et à travers la plaque électronique et le dissipateur en mousse métallique (figure III.1). L'objectif est multiple, premièrement c'est de pouvoir déterminer sous les conditions d'un flux imposé dissipé par le composant et une vitesse de l'air connue à l'entrée du canal, la température du composant électronique. Deuxièmement, c'est discuté les effets de

l'augmentation du flux thermiques du composants, de l'augmentation de la vitesse de l'air à l'entrée, et du type de métal utilisé pour la mousse.

### III.2 Géométrie du système simulé

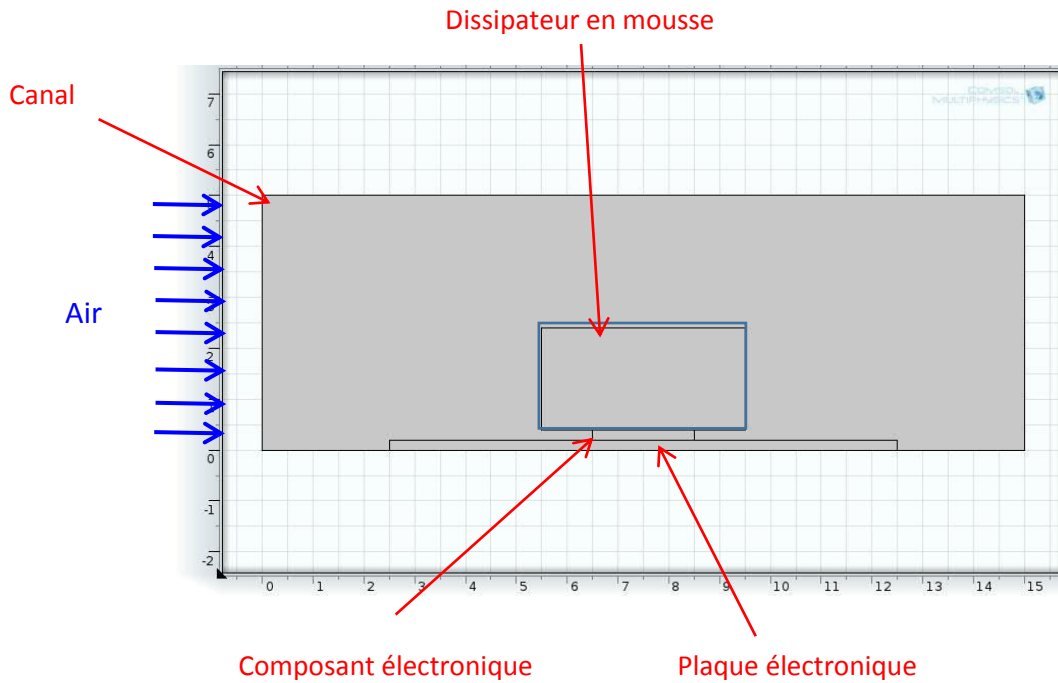


Figure III.1 : Schéma du système de refroidissement simulé.

### III.3 Maillage du système simulé

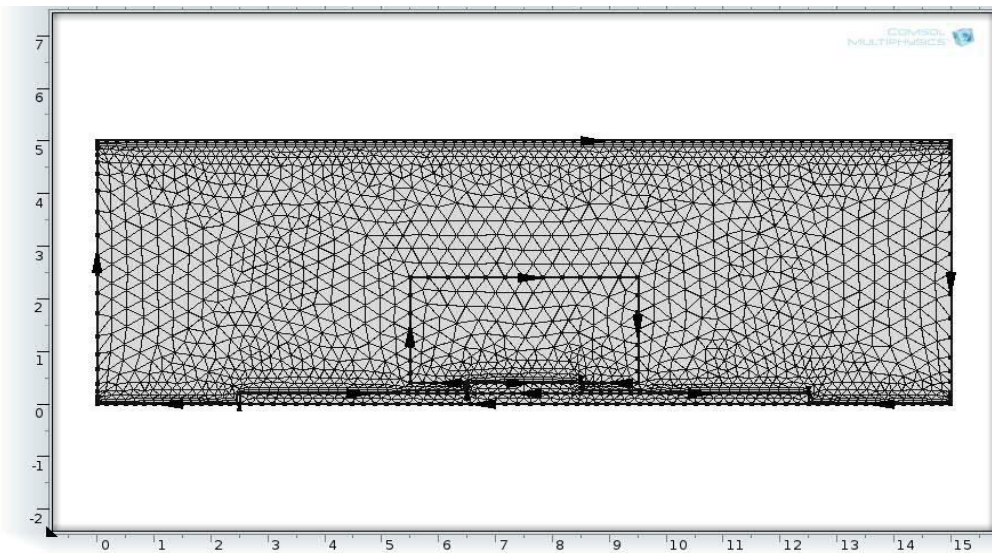


Figure III.2 : Maillage du système de refroidissement simulé.

### III.4 Consistance du maillage

Afin de déterminer à quel nombre d'éléments la solution des équations aux dérivées partielles (EDP) qui régissent le modèle adopté, Une étude de la consistance de maillage a été menée. Le maillage COMSOL utilise des éléments triangulaires avec un raffinement d'élément triangulaire local. La solution pour un écoulement constant à travers la mousse métallique a été réalisée à différents nombres d'éléments de domaine. Le modèle de mousse métallique a été résolu cinq fois différentes. Le nombre d'éléments utilisés pour créer le maillage (500 éléments, 1030 éléments, 1630 éléments, 3130 éléments et 6606 éléments) a été adopté afin de déterminer la taille de maillage la plus efficace (en termes de changement des températures résultantes par rapport au temps de calcul) .

Les figures III.3 (a) et (b) montrent les profils de température à l'intérieur de la mousse métallique par rapport aux axes sans dimension Y et X respectivement. La solution a atteint constante avec variation inférieure à 1E-03% au nombre d'éléments (N) = 6606 éléments.

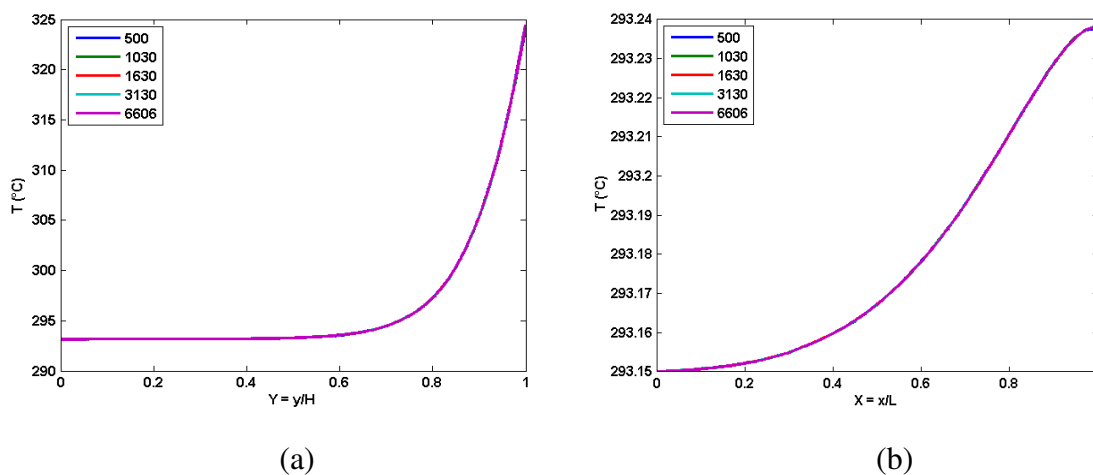


Figure III.3 : Consistance du maillage pour (a) la température par rapport à l'axe adimensionnel  $Y = y / H$ , (b) la température par rapport à l'axe adimensionnel  $X = x / L$ .

## III.5 Résultats de la simulation thermohydraulique

### III.5.1 Températures pour : $q_{\text{source}}=150 \text{ W}$ , $u_0=20 \text{ cm/s}$ et $t=3600 \text{ s}$

Les trois premières figures (III.4.a, b et c) représentent la distribution de la température en deux dimensions au sein du canal comportant la plaque et le composant électronique régi par un écoulement de l'air pour régime transitoire correspondant à un temps d'écoulement  $t=3600\text{s}$ . La quatrième figure (III.4.d) représente la comparaison des profils de température à l'interface composant-mousse métallique sous les mêmes conditions d'écoulement.

Sous les conditions d'un flux thermique imposé du composant égale à  $\phi = 150 \text{ W}$  ( $100 \text{ W/cm}^2$ ) et une vitesse de l'air à l'entrée du canal égale à  $u_0=20 \text{ cm/s}$ , la distribution de la température en 2D au sein du canal est caractérisée par : une température proche de la température ambiante en amont du canal et dans sa partie supérieure comprise entre la mousse et la paroi supérieur du canal. La température au niveau de la mousse métallique est proche de  $345 \text{ K}$  pour l'aluminium et le graphite et elle égale à  $350 \text{ K}$  pour le cuivre.

Pour une vitesse de l'air à l'entrée du canal  $u_0=20 \text{ cm/s}$  et un flux thermique global du composant  $\phi = 150 \text{ W}$  ( $100 \text{ W/cm}^2$ ), La comparaison des profils des températures figurant à la quatrième figure (III.4.d) montre la distribution de la température à l'interface du composant-mousse métallique. La mousse en graphite permette de refroidir de mieux le composant à des températures moyennes proches de  $343 \text{ K}$ , celle en aluminium est proche de  $347 \text{ K}$ , alors que la mousse en cuivre montre des températures plus hautes pour ces conditions d'écoulement et elle est égale à  $349 \text{ K}$ .

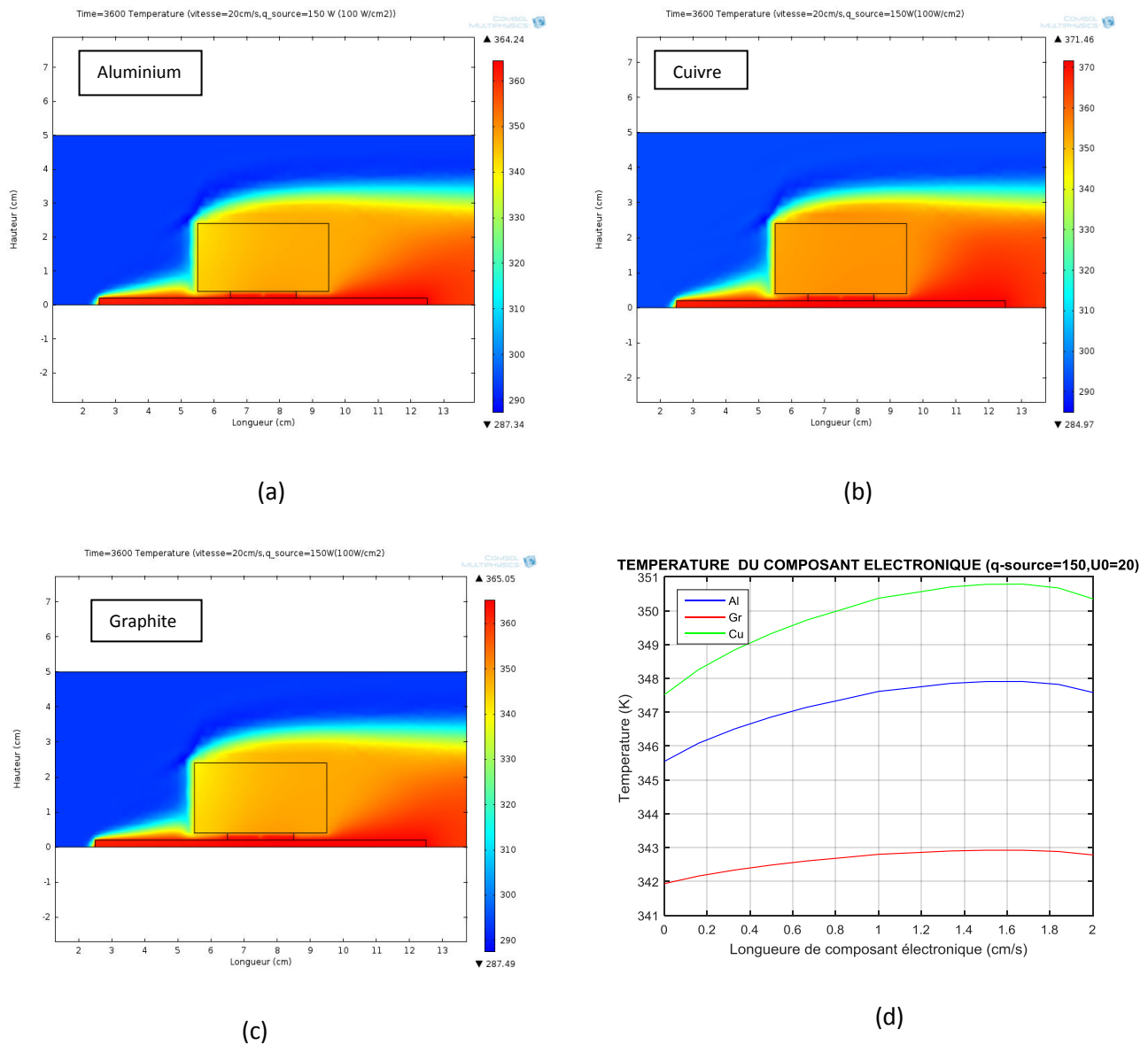


Figure III.4 : distribution de la température en 2D pour (a) l’aluminium, (b) le cuivre et (c) le graphite, (d) comparaison des profils des températures pour les trois métaux au niveau de l’interface composant-mousse métallique.

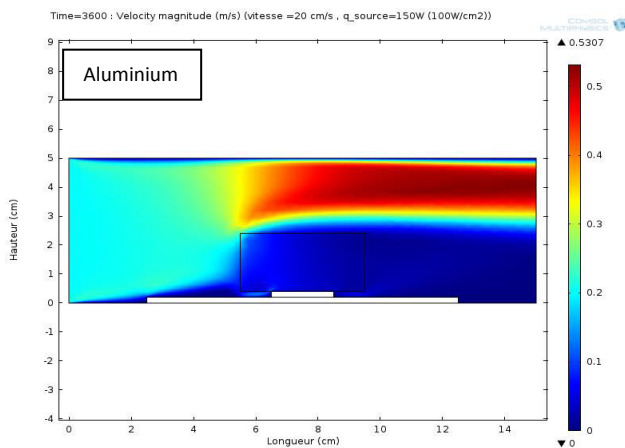
### III.5.2 Vitesses pour : $q_{source}=150 \text{ W}$ , $u_0=20 \text{ cm/s}$ et $t= 3600 \text{ s}$

Les trois premières figures représentent la distribution de la vitesse en deux dimensions au sein du canal comportant la plaque et le composant électroniques régi par un écoulement de l’air pour un régime transitoire correspondant à un temps d’écoulement  $t= 3600\text{s}$ . La quatrième figure représente la comparaison des profils de la vitesse ou centre de composant-mousse métallique sous les mêmes conditions d’écoulement.

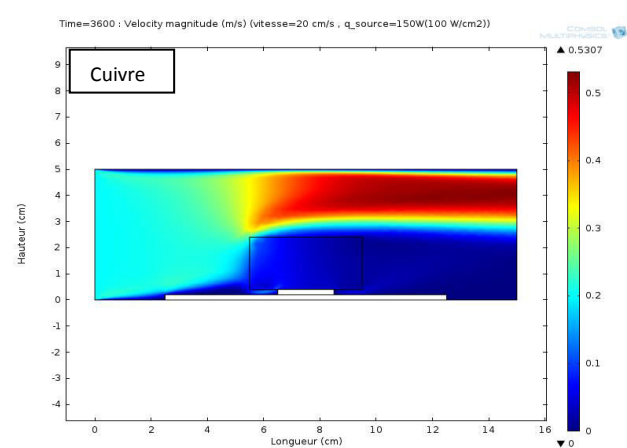
Sous les conditions d’un flux thermique imposé du composant égale à  $\phi = 150 \text{ W}$  ( $100 \text{ W/cm}^2$ ) et une vitesse de l’air à l’entrée du canal égale à  $u_0= 20 \text{ cm/s}$ , la distribution de la

vitesse en 2D au sein du canal est caractérisée par : en l'amont du canal la vitesse de l'air est moyenne (elle est proche de 0.2 m/s pour les trois métaux) ainsi que le haut du canal loin du composant, tandis que l'aval du canal en haut, la vitesse de l'air est proche de 0.5 m/s pour les trois métaux (l'aluminium et le graphite, le cuivre). La vitesse au niveau de la mousse métallique est proche de 0.1 m/s pour les trois métaux.

Pour une vitesse de l'air à l'entrée du canal  $u_0 = 20$  cm/s et un flux thermique global du composant  $\phi = 150$  W ( $100$  W/cm<sup>2</sup>), La comparaison des profils des vitesses figurant à la quatrième figure montre la distribution de la vitesse de l'air au plan médian du canal incluant la région libre du canal occupé par l'air et la mousse. La vitesse de l'air au sein de la mousse du graphite est plus grande en comparaison avec celles du cuivre et de l'aluminium, cette vitesse moyenne est proche de 4.5 cm/s, alors que pour l'aluminium et le cuivre elle est proche de 4.2 cm/s pour les mêmes conditions d'écoulement.



(a)



(b)

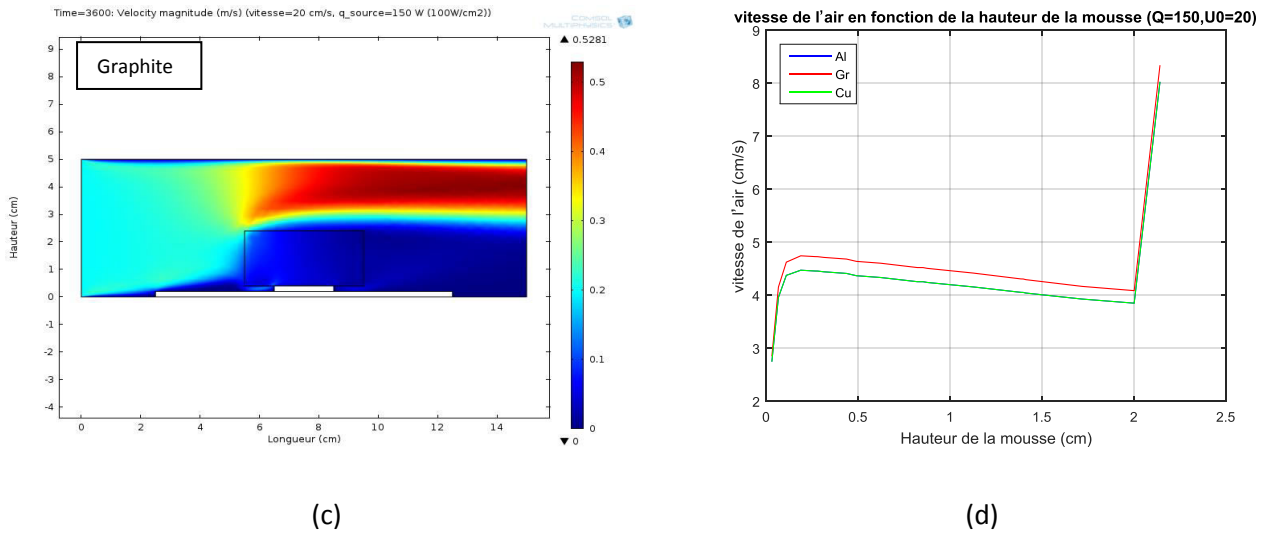


Figure III.5 : distribution de la vitesse en 2D pour (a) l'aluminium, (b) le cuivre et (c) le graphite, (d) comparaison des profils des vitesses pour les trois métaux au niveau de centre de composant-mousse métallique.

### III.5.3 Températures pour : $q_{\text{source}}=150 \text{ W}$ , $u_0=30 \text{ cm/s}$ et $t=3600 \text{ s}$

L'effet de l'augmentation de la vitesse de l'air à l'entrée du canal à  $u_0=30 \text{ cm/s}$  pour la même valeur du flux thermique présenté à la figure (III.6.a, b et c), montre un effet de chute de la température au sein du canal en comparaison avec celle pour  $u_0=20 \text{ cm/s}$ ; l'amont du canal montre la température la plus basse (elle est proche de 290 K pour les trois métaux) ainsi que le haut du canal loin du composant, tandis que l'aval du canal et au niveau de la plaque la température est proche de 340 K pour les trois métaux. La température au niveau de la mousse métallique est proche de 325 K pour les trois métaux.

La comparaison des profils des températures (figure III.6.d) montre la distribution de la température à l'interface du composant-mousse métallique. La mousse en graphite permet de refroidir de mieux le composant à des températures moyennes proches de 325 K, celle en aluminium est proche de 328 K, alors que celle du cuivre est la plus haute pour ces conditions d'écoulement et elle est égale à 329 K.

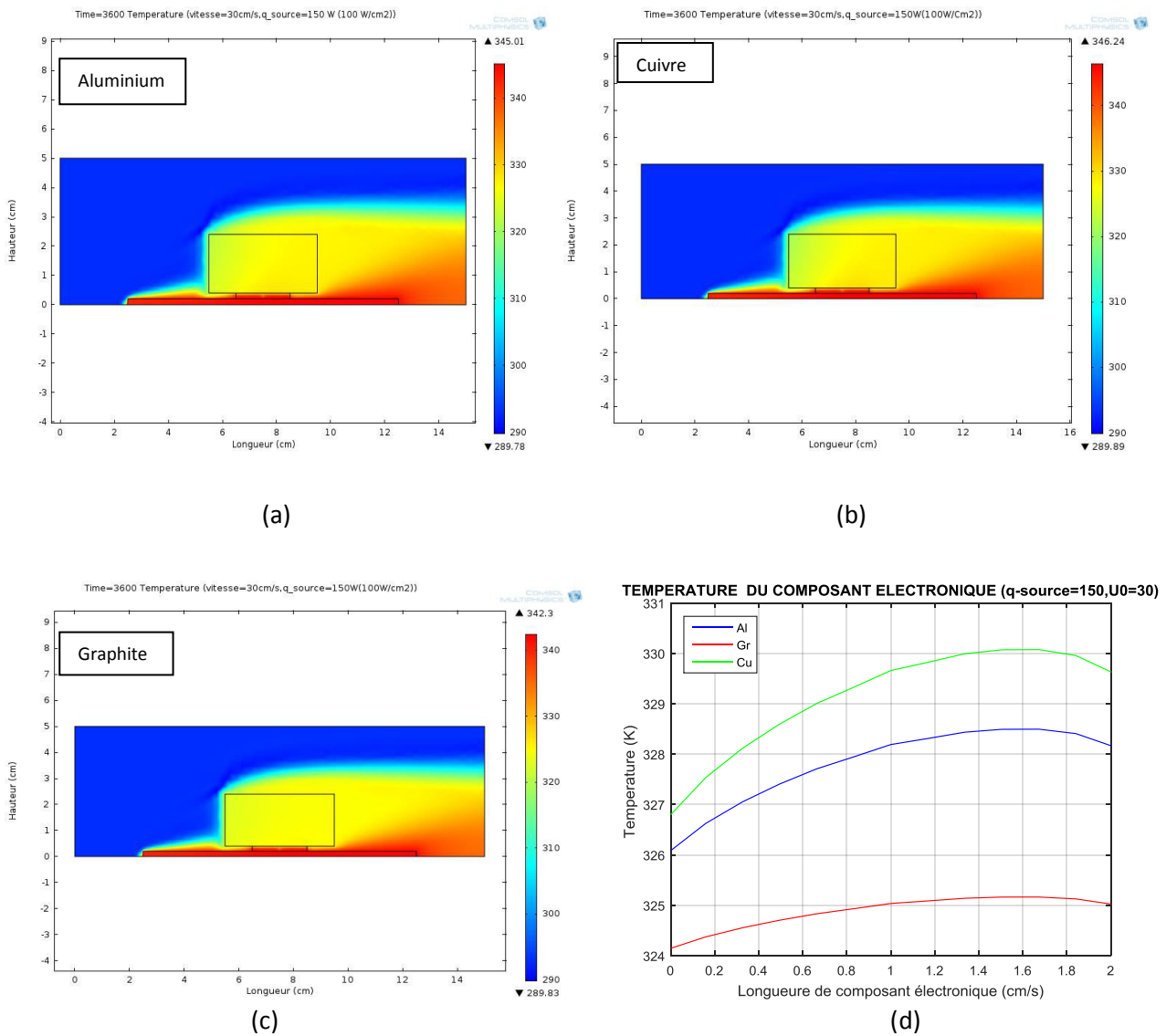


Figure III.6 : distribution de la température en 2D pour (a) l’aluminium, (b) le cuivre et (c) le graphite, (d) comparaison des profils des températures pour les trois métaux au niveau de l’interface composant-mousse métallique

**III.5.4 Vitesses pour :  $q_{source}=150 \text{ W}$ ,  $u_0=30 \text{ cm/s}$  et  $t= 3600 \text{ s}$**

L’augmentation de la vitesse de l’air à l’entrée du canal à  $u_0= 30 \text{ cm/s}$ , et pour la même valeur du flux thermique (figure III.7, a, b et c) présente les caractéristiques suivantes : en l’amont du canal la vitesse de l’air est moyenne (elle est proche de  $0.3 \text{ m/s}$  pour les trois métaux) ainsi que le haut du canal loin du composant, tandis que l’aval du canal en haut, la vitesse de l’air est proche de  $0.7 \text{ m/s}$  pour les trois métaux (l’aluminium et le graphite, le cuivre). La vitesse au niveau de la mousse métallique est proche de  $0.1 \text{ m/s}$  pour les trois métaux.

La comparaison des profils des vitesses (figure III.7.d) montre la distribution de la vitesse de l'air au plan médian du canal incluant la région libre du canal occupé par l'air et la mousse. La vitesse de l'air au sein de la mousse du graphite est plus grande en comparaison avec celles du cuivre et de l'aluminium, cette vitesse moyenne est proche de 7.7 cm/s, alors que pour l'aluminium et le cuivre elle est proche de 8.0 cm/s pour les mêmes conditions d'écoulement.

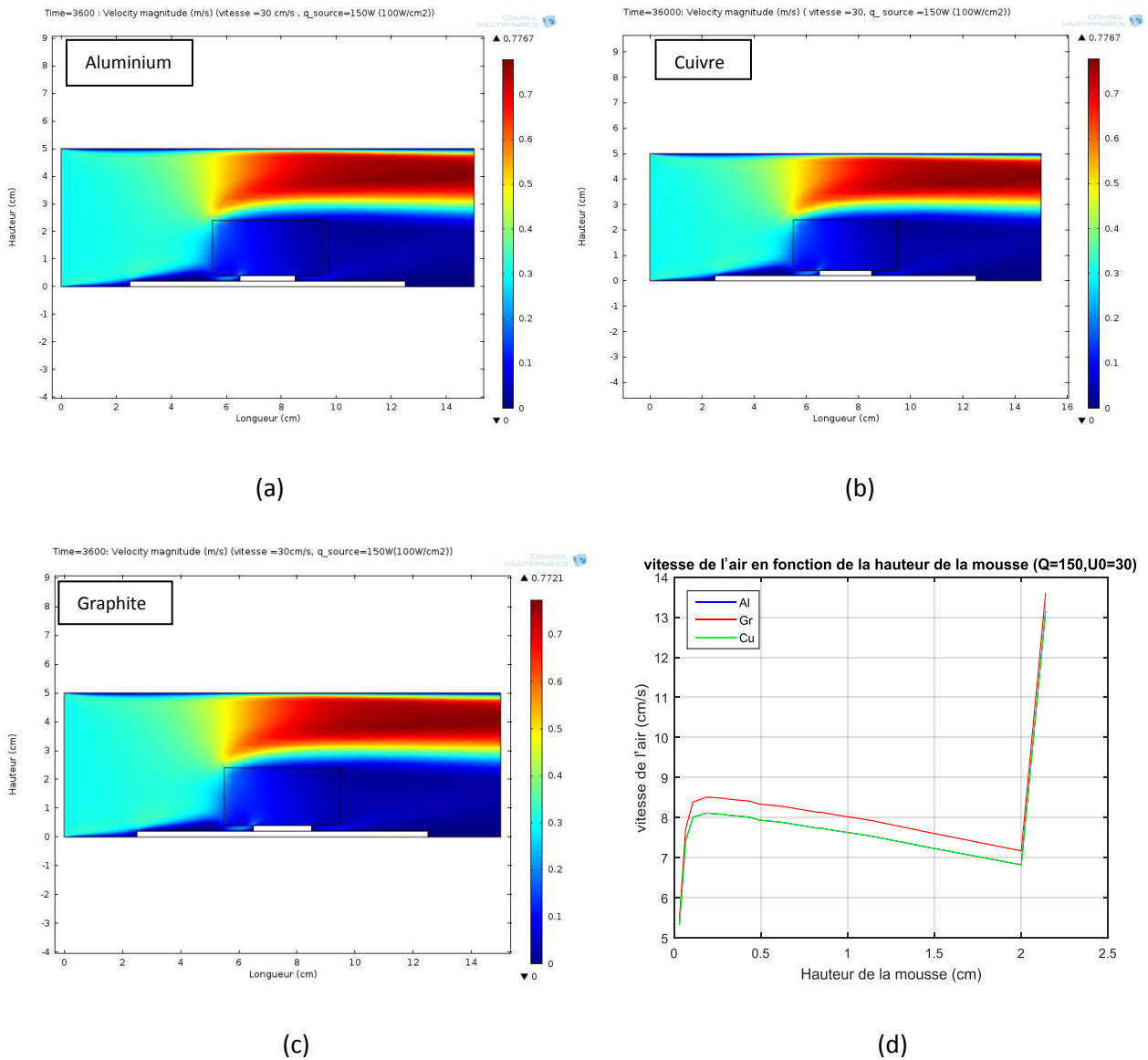
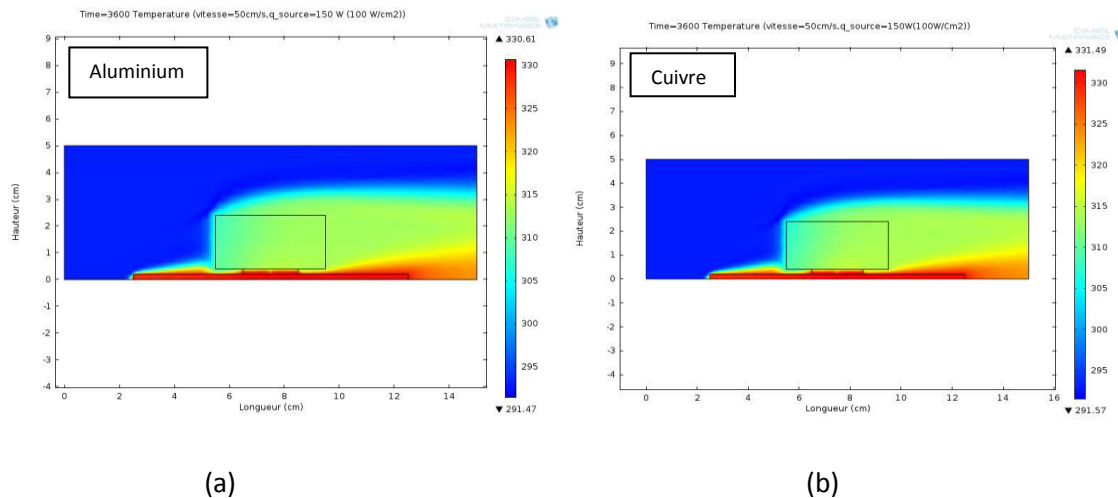


Figure III.7 : distribution de la vitesse en 2D pour (a) l'aluminium, (b) le cuivre et (c) le graphite, (d) comparaison des profils des vitesses pour les trois métaux au niveau de centre de composant-mousse métallique.

### III.5.5 Températures pour : $q_{\text{source}}=150 \text{ W}$ , $u_0=50 \text{ cm/s}$ et $t=3600 \text{ s}$

L'effet de l'augmentation de la vitesse de l'air à l'entrée du canal à  $u_0=50 \text{ cm/s}$  pour la même valeur du flux thermique présenté à la figure (III.8.a,b et c), montre un effet de chute de la température au sein du canal en comparaison avec celles pour  $u_0=20 \text{ cm/s}$  et de  $u_0=30 \text{ cm/s}$ ; l'amant du canal montre la température la plus basse (elle est proche de 295 K pour les trois métaux) ainsi que le haut du canal loin du composant, tandis que l'aval du canal et au niveau de la plaque la température est proche de 325 K pour le graphite, l'aluminium et le cuivre proche de 330 K. La température au niveau de la mousse métallique est proche de 310 K pour les trois métaux.

La comparaison des profils des températures (figure III.8.d) montre la distribution de la température à l'interface du composant-mousse métallique. La mousse en graphite permet de refroidir de mieux le composant à des températures moyennes proches de 311.5 K, celle en aluminium est proche de 313.5 K, alors que celle du cuivre est la plus haute pour ces conditions d'écoulement et elle est égale à 314.5 K.



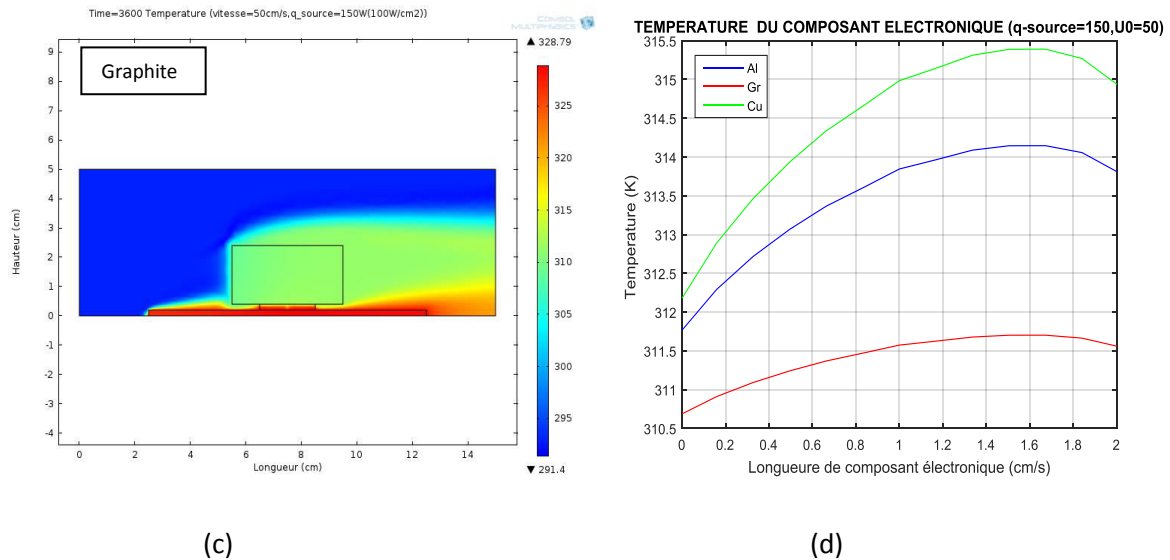


Figure III.8 : distribution de la température en 2D pour (a) l’aluminium, (b) le cuivre et (c) le graphite, (d) comparaison des profils des températures pour les trois métaux au niveau de l’interface composant-mousse métallique.

### III.5.6 Vitesses pour : $q_{source}=150\text{ W}$ , $u_0=50\text{ cm/s}$ et $t=3600\text{ s}$

L’augmentation de la vitesse de l’air à l’entrée du canal à  $u_0=50\text{ cm/s}$ , et pour la même valeur du flux thermique (figure III.9, a, b et c) présente les caractéristiques suivantes : en l’amont du canal la vitesse de l’air est moyenne (elle est proche de  $0.5\text{ m/s}$  pour les trois métaux) ainsi que le haut du canal loin du composant, tandis que l’aval du canal en haut, la vitesse de l’air est proche de  $1.2\text{ m/s}$  pour les trois métaux (l’aluminium et le graphite, le cuivre). La vitesse au niveau de la mousse métallique est proche de  $0.2\text{ m/s}$  pour les trois métaux.

La comparaison des profils des vitesses (figure III.9.d) montre la distribution de la vitesse de l’air au plan médian du canal incluant la région libre du canal occupé par l’air et la mousse. La vitesse de l’air au sein de la mousse du graphite est plus grande en comparaison avec celles du cuivre et de l’aluminium, cette vitesse moyenne est proche de  $16.2\text{ cm/s}$ , alors que pour l’aluminium et le cuivre elle est proche de  $15\text{ cm/s}$  pour les mêmes conditions d’écoulement.

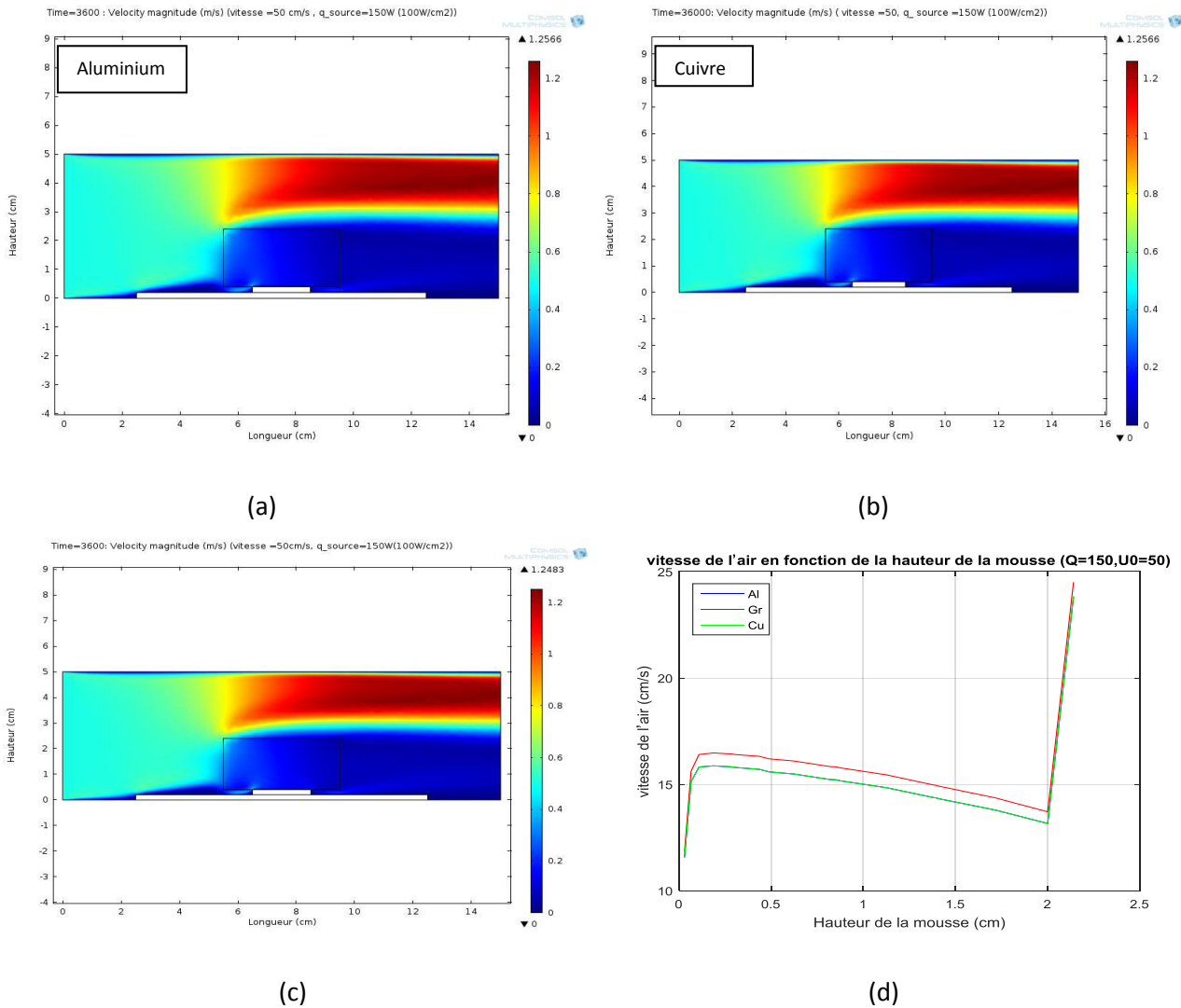


Figure III.9 : distribution de la vitesse en 2D pour (a) l’aluminium, (b) le cuivre et (c) le graphite, (d) comparaison des profils des vitesses pour les trois métaux au niveau de centre de composant-mousse métallique.

### III.5.7 Températures pour : $q_{source}=150\text{ W}$ , $u_0=70\text{ cm/s}$ et $t=3600\text{ s}$

L’effet de l’augmentation de la vitesse de l’air à l’entrée du canal à  $u_0=70\text{ cm/s}$  pour la même valeur du flux thermique présenté à la figure (III.10.a,b et c), montre un effet de chute de la température au sein du canal en comparaison avec celles pour  $u_0=30\text{ cm/s}$  et de  $u_0=50\text{ cm/s}$ ; l’amant du canal montre la température la plus basse (elle est proche de 295 K pour les trois métaux) ainsi que le haut du canal loin du composant, tandis que l’aval du canal et au niveau de la plaque la température est proche de 320 K pour le graphite et l’aluminium, le cuivre proche de 325 K. La température au niveau de la mousse métallique est proche de 305 K pour les trois métaux.

La comparaison des profils des températures (figure III.10.d) montre la distribution de la température à l'interface du composant-mousse métallique. La mousse en graphite permet de refroidir de mieux le composant à des températures moyennes proches de 306 K, celle en aluminium est proche de 308 K, alors que celle du cuivre est la plus haute pour ces conditions d'écoulement et elle est égale à 309 K.

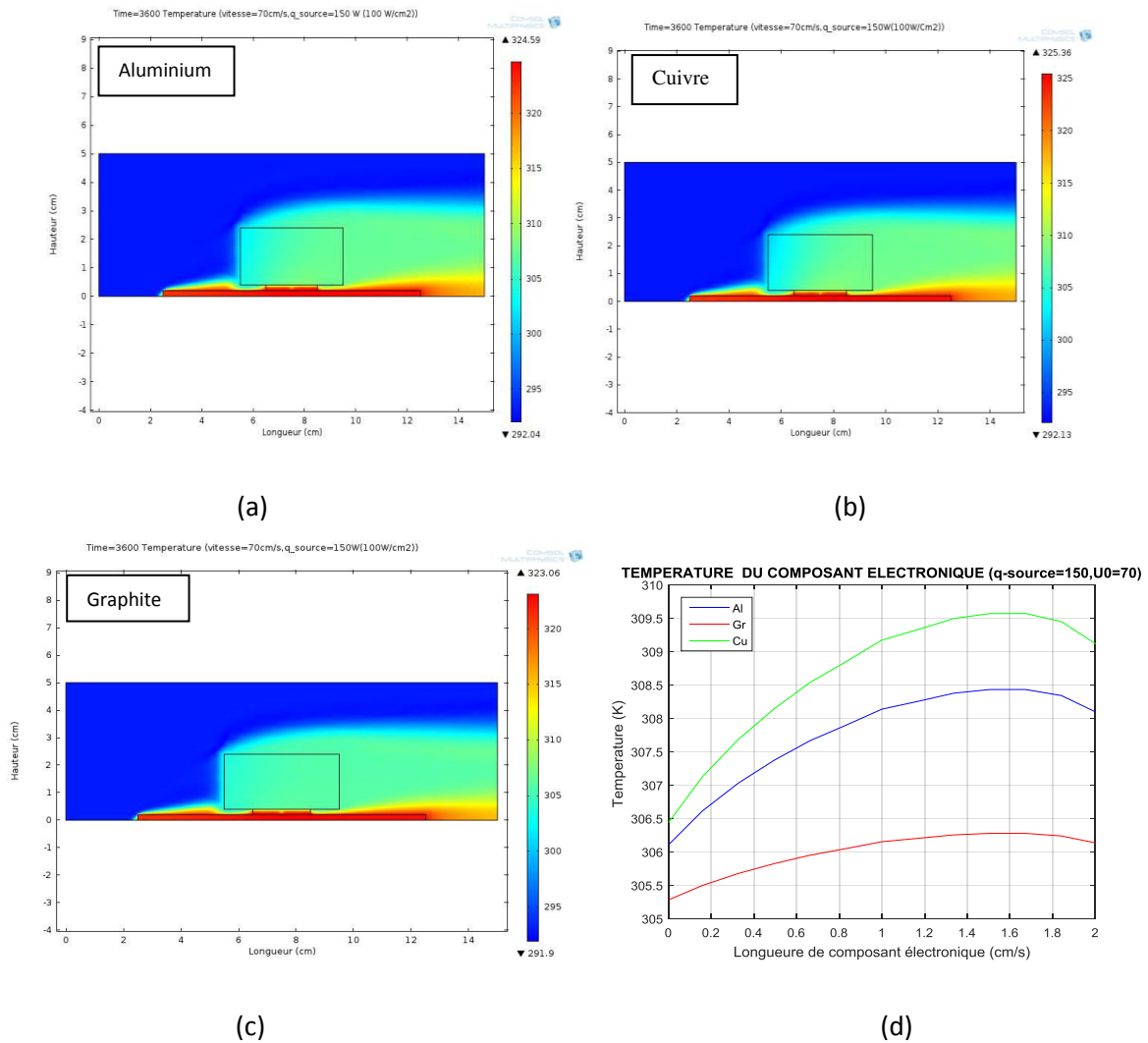


Figure III.10 : distribution de la température en 2D pour (a) l'aluminium, (b) le cuivre et (c) le graphite, (d) comparaison des profils des températures pour les trois métaux au niveau de l'interface composant-mousse métallique.

**III.5.8 Vitesses pour :  $q_{source}=150\text{ W}$ ,  $u_0=70\text{ cm/s}$  et  $t=3600\text{ s}$**

L'augmentation de la vitesse de l'air à l'entrée du canal à  $u_0=70\text{ cm/s}$ , et pour la même valeur du flux thermique (figure III.11, a, b et c) présente les caractéristiques suivantes : en amont du canal la vitesse de l'air est moyenne (elle est proche de 0.7 m/s pour les trois

métaux) ainsi que le haut du canal loin du composant, tandis que l’aval du canal en haut, la vitesse de l’air est proche de 1.6 m/s pour les trois métaux (l’aluminium et le graphite ,le cuivre ) . La vitesse au niveau de la mousse métallique est proche de 0.2 m/s pour les trois métaux.

La comparaison des profils des vitesses (figure III.11.d) montre la distribution de la vitesse de l’air au plan médian du canal incluant la région libre du canal occupé par l’air et la mousse. La vitesse de l’air au sein de la mousse du graphite est plus grande en comparaison avec celles du cuivre et de l’aluminium, cette vitesse moyenne est proche de 23.5 cm/s, alors que pour l’aluminium et le cuivre elle est proche de 22.5 cm/s pour les mêmes conditions d’écoulement.

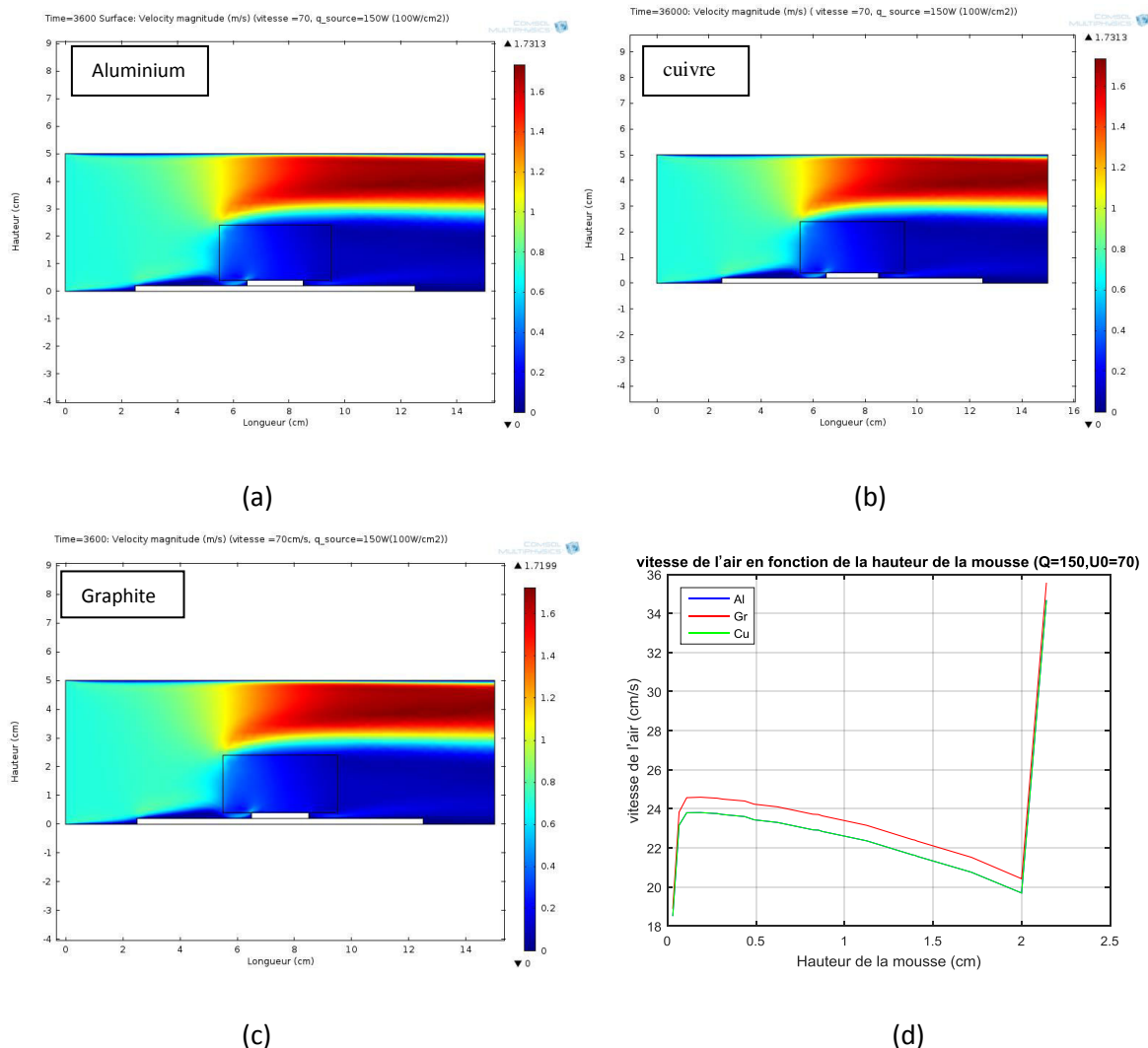


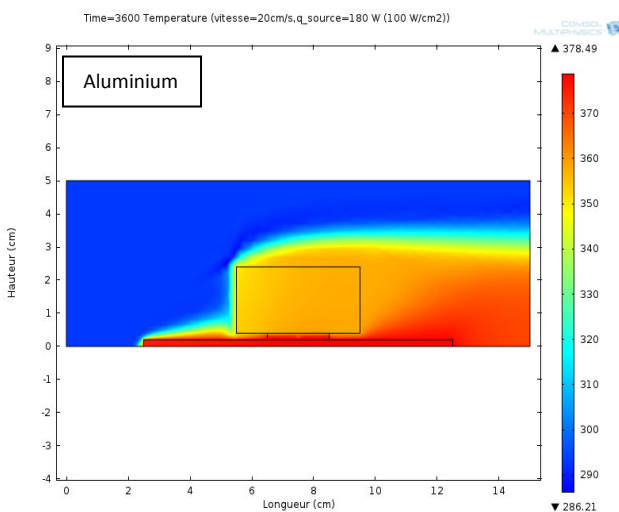
Figure III.11 : distribution de la vitesse en 2D pour (a) l’aluminium, (b) le cuivre et (c) le graphite, (d) comparaison des profils des vitesses pour les trois métaux au niveau de centre de composant-mousse métallique.

**III.5.9 Températures pour :  $q_{source}=180\text{ W}$ ,  $u_0=20\text{ cm/s}$  et  $t=3600\text{ s}$**

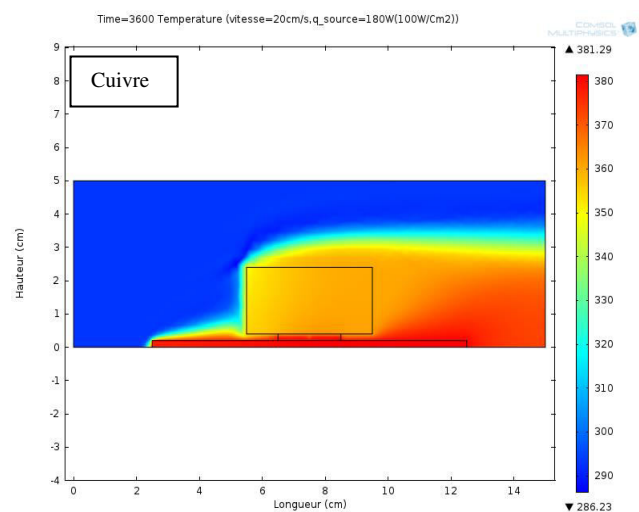
Les figures (Figure III.12.a, b et c) représentent la distribution de la température en deux dimensions au sein du canal comportant la plaque et le composant électronique régi par un écoulement de l’air pour un régime transitoire correspondant à un temps d’écoulement  $t=3600\text{s}$ . La figure (III.12.d) représente la comparaison des profils de température à l’interface composant-mousse métallique sous les mêmes conditions d’écoulement.

Sous les conditions d’un flux thermique imposé du composant égale à  $\phi = 180\text{ W}$  et une vitesse de l’air à l’entrée du canal égale à  $u_0=20\text{ cm/s}$ , la distribution de la température en 2D au sein du canal est caractérisée par : l’amont du canal montre la température la plus basse (elle est proche de  $290\text{ K}$  pour les trois métaux) ainsi que le haut du canal loin du composant, tandis que l’aval du canal et au niveau de la plaque la température est proche de  $370\text{ K}$  pour le graphite et l’aluminium , le cuivre proche de  $380\text{ K}$ . La température au niveau de la mousse métallique est proche de  $350\text{ K}$  pour le graphite, l’aluminium et le cuivre proche de  $355\text{ K}$ .

La comparaison des profils des températures (figure III.12.d) montre la distribution de la température à l’interface du composant-mousse métallique. La mousse en graphite permette de refroidir de mieux le composant à des températures moyennes proches de  $353\text{ K}$ , celle en aluminium est proche de  $358\text{ K}$ , alors que celle du cuivre est la plus haute pour ces conditions d’écoulement et elle est égale à  $362\text{ K}$ .



(a)



(b)

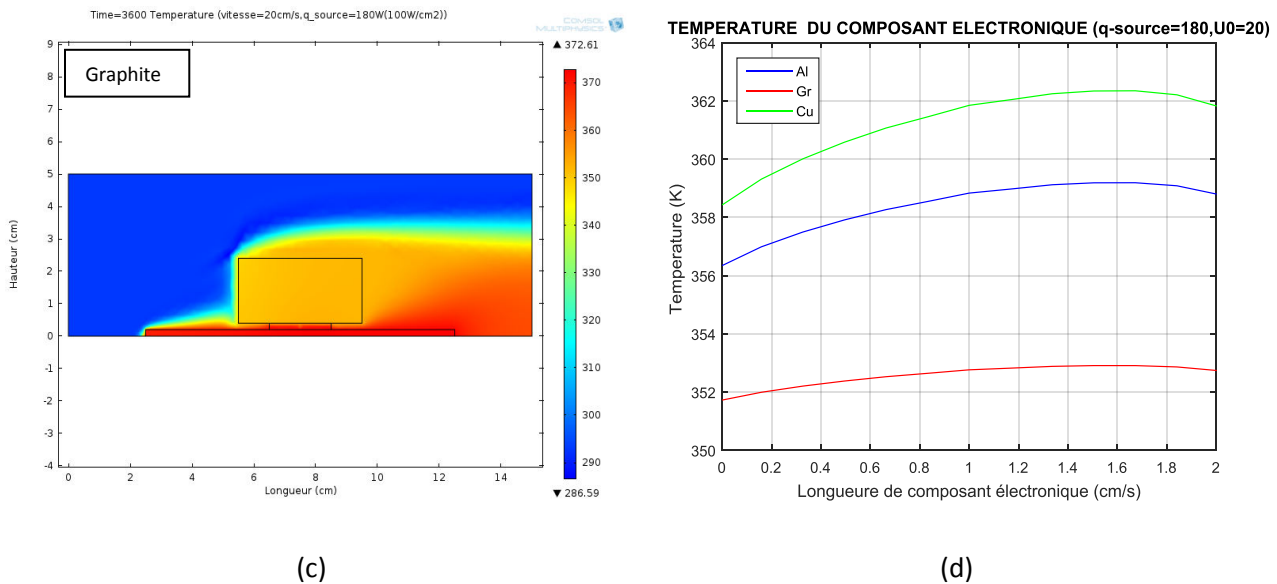


Figure III.12 : distribution de la température en 2D pour (a) l’aluminium, (b) le cuivre et (c) le graphite, (d) comparaison des profils des températures pour les trois métaux au niveau de l’interface composant-mousse métallique

**III.5.10 Vitesses pour :  $q_{source}=180\text{ W}$ ,  $u_0=20\text{ cm/s}$  et  $t=3600\text{ s}$**

Les figures (Figure III.13.a, b et c) représentent la distribution de la vitesse en deux dimensions au sein du canal comportant la plaque et le composant électroniques régi par un écoulement de l’air pour un régime transitoire correspondant à un temps d’écoulement  $t=3600\text{ s}$ . La quatrième figure représente la comparaison des profils de la vitesse ou centre de composant-mousse métallique sous les mêmes conditions d’écoulement.

Sous les conditions d’un flux thermique imposé du composant égale à  $\phi = 180\text{ W}$  ( $100\text{ W/cm}^2$ ) et une vitesse de l’air à l’entrée du canal égale à  $u_0=20\text{ cm/s}$ , la distribution de la vitesse en 2D au sein du canal est caractérisée par : l’amont du canal la vitesse de l’air est moyenne (elle est proche de  $0.2\text{ m/s}$  pour les trois métaux) ainsi que le haut du canal loin du composant, tandis que l’aval du canal en haut, la vitesse de l’air est proche de  $0.5\text{ m/s}$  pour les trois métaux (l’aluminium et le graphite ,le cuivre ). La vitesse au niveau de la mousse métallique est proche de  $0.1\text{ m/s}$  pour les trois métaux.

Pour une vitesse de l’air à l’entrée du canal  $u_0=20\text{ cm/s}$  et un flux thermique global du composant  $\phi = 180\text{ W}$  ( $100\text{ W/cm}^2$ ), La comparaison des profils des vitesses figurant à la quatrième figure montre la distribution de la vitesse de l’air au plan médian du canal incluant la région libre du canal occupé par l’air et la mousse. La vitesse de l’air au sein de

la mousse du graphite est plus grande en comparaison avec celles du cuivre et de l'aluminium, cette vitesse moyenne est proche de 4.5 cm/s, alors que pour l'aluminium et le cuivre elle est proche de 4.2 cm/s pour les mêmes conditions d'écoulement.

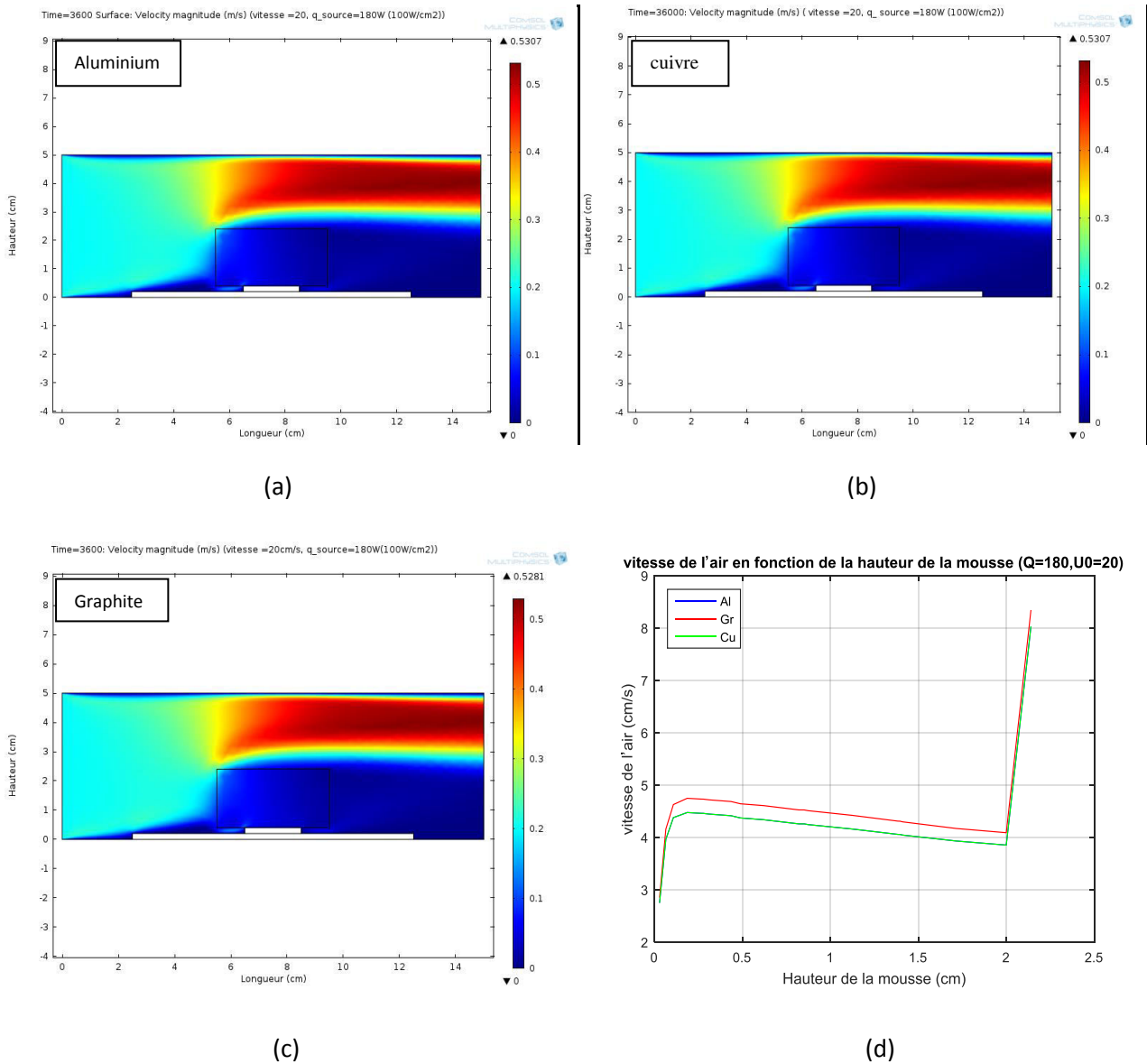


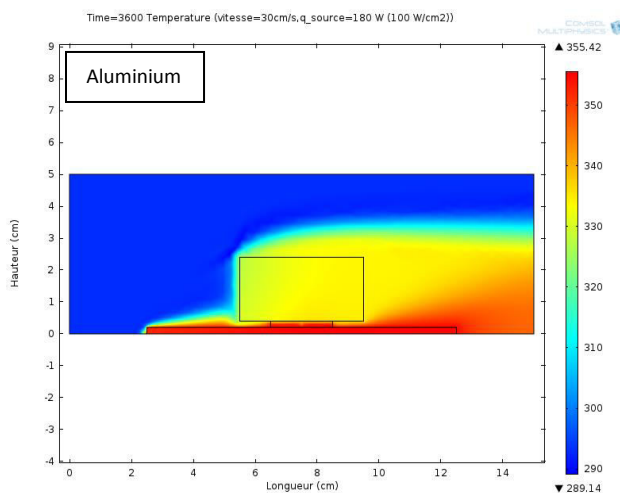
Figure III.13 : distribution de la vitesse en 2D pour (a) l'aluminium, (b) le cuivre et (c) le graphite, (d) comparaison des profils des vitesses pour les trois métaux au niveau de centre de composant-mousse métallique.

### III.5.11 Températures pour : $q_{source}=180 \text{ W}$ , $u_0=30 \text{ cm/s}$ et $t= 3600 \text{ s}$

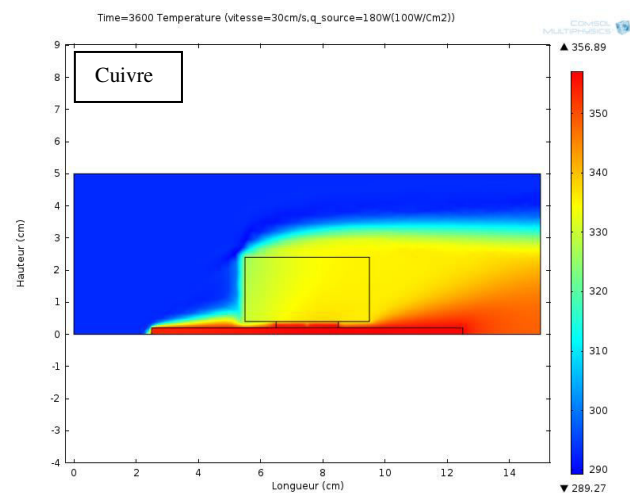
L'effet de l'augmentation de la vitesse de l'air à l'entrée du canal à  $u_0=30 \text{ cm/s}$  pour la même valeur du flux thermique présenté à la figure (III.14.a, b et c), montre un effet de chute de la température au sein du canal en comparaison avec celle pour  $u_0=20 \text{ cm/s}$ ;

l'amont du canal montre la température la plus basse (elle est proche de 290 K pour les trois métaux) ainsi que le haut du canal loin du composant, tandis que l'aval du canal et au niveau de la plaque la température est proche de 350 K pour les trois métaux. La température au niveau de la mousse métallique est proche de 330 K pour le graphite, l'aluminium et le cuivre proche de 335 K.

La comparaison des profils des températures (figure III.14d) montre la distribution de la température à l'interface du composant-mousse métallique. La mousse en graphite permet de refroidir de mieux le composant à des températures moyennes proches de 331 K, celle en aluminium est proche de 334 K, alors que celle du cuivre est la plus haute pour ces conditions d'écoulement et elle est égale à 336 K.



(a)



(b)

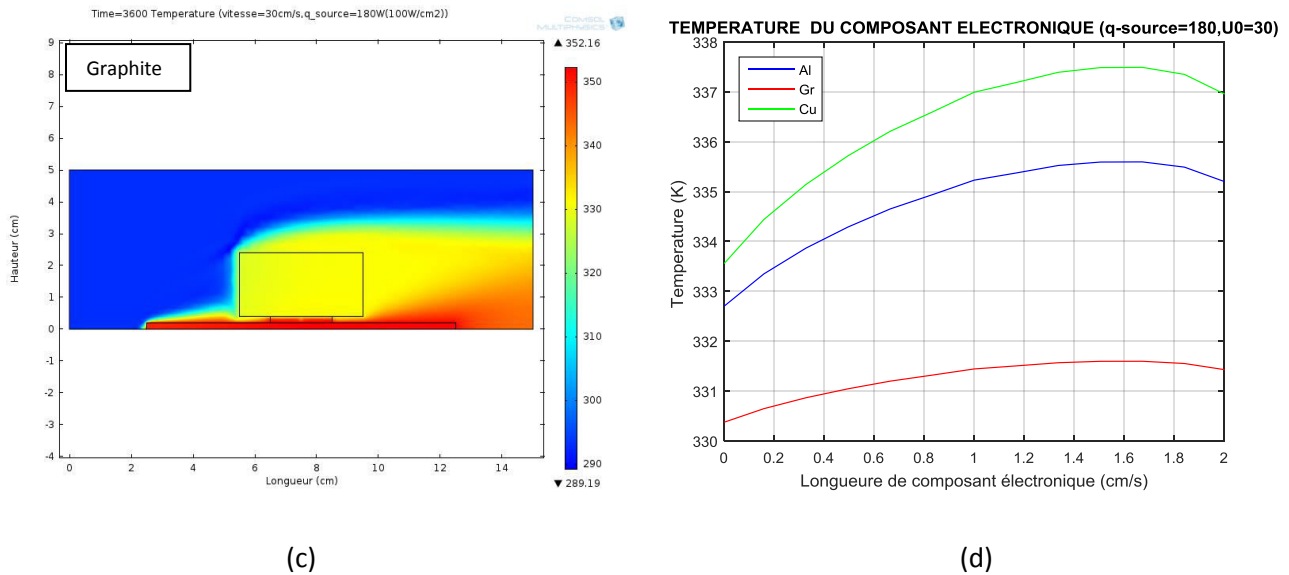


Figure III.14 :distribution de la température en 2D pour (a) l’aluminium, (b) le cuivre et (c) le graphite, (d) comparaison des profils des températures pour les trois métaux au niveau de l’interface composant-mousse métallique

**III.5.12 Vitesses pour :  $q_{source}=180\text{ W}$ ,  $u_0=30\text{ cm/s}$  et  $t= 3600\text{ s}$**

L’augmentation de la vitesse de l’air à l’entrée du canal à  $u_0= 30\text{ cm/s}$ , et pour la même valeur du flux thermique (figure III.15, a, b et c) présente les caractéristiques suivantes : l’amont du canal la vitesse de l’air est moyenne (elle est proche de  $0.3\text{ m/s}$  pour les trois métaux) ainsi que le haut du canal loin du composant, tandis que l’aval du canal en haut, la vitesse de l’air est proche de  $0.7\text{ m/s}$  pour les trois métaux (l’aluminium et le graphite ,le cuivre ) . La vitesse au niveau de la mousse métallique est proche de  $0.1\text{ m/s}$  pour les trois métaux.

La comparaison des profils des vitesses (figure III.15.d) montre la distribution de la vitesse de l’air au plan médian du canal incluant la région libre du canal occupé par l’air et la mousse. La vitesse de l’air au sein de la mousse du graphite est plus grande en comparaison avec celles du cuivre et de l’aluminium, cette vitesse moyenne est proche de  $8.0\text{ cm/s}$ , alors que pour l’aluminium et le cuivre elle est proche de  $7.7\text{ cm/s}$  pour les mêmes conditions d’écoulement.

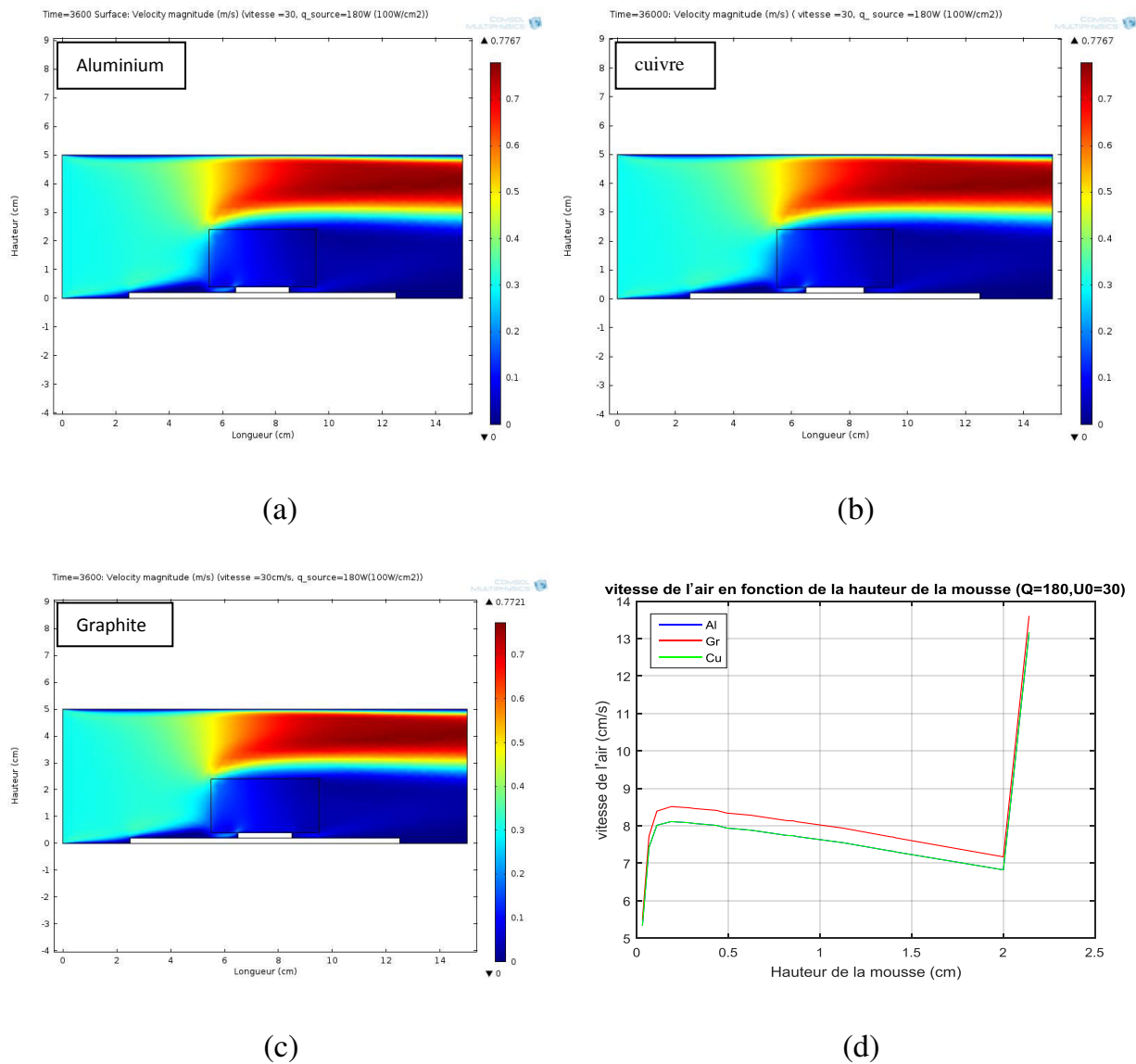


Figure III.15: distribution de la vitesse en 2D pour (a) l'aluminium, (b) le cuivre et (c) le graphite, (d) comparaison des profils des vitesses pour les trois métaux au niveau de centre de composant-mousse métallique.

### III.5.13 Températures pour : $q_{\text{source}}=180 \text{ W}$ , $u_0=50 \text{ cm/s}$ et $t=3600 \text{ s}$

L'effet de l'augmentation de la vitesse de l'air à l'entrée du canal à  $u_0=50 \text{ cm/s}$  pour la même valeur du flux thermique présenté à la figure (III.16.a,b et c), montre un effet de chute de la température au sein du canal en comparaison avec celles pour  $u_0=30 \text{ cm/s}$  et de  $u_0=30 \text{ cm/s}$ ; l'amont du canal montre la température la plus basse (elle est proche de 295 K pour les trois métaux) ainsi que le haut du canal loin du composant, tandis que l'aval du canal et au niveau de la plaque la température est proche de 335 K pour les trois métaux. La température au niveau de la mousse métallique est proche de 315 K pour les trois métaux

La comparaison des profils des températures (figure III.16.d) montre la distribution de la température à l'interface du composant-mousse métallique. La mousse en graphite permet de refroidir de mieux le composant à des températures moyennes proches de 315 K, celle en aluminium est proche de 317 K, alors que celle du cuivre est la plus haute pour ces conditions d'écoulement et elle est égale à 319 K.

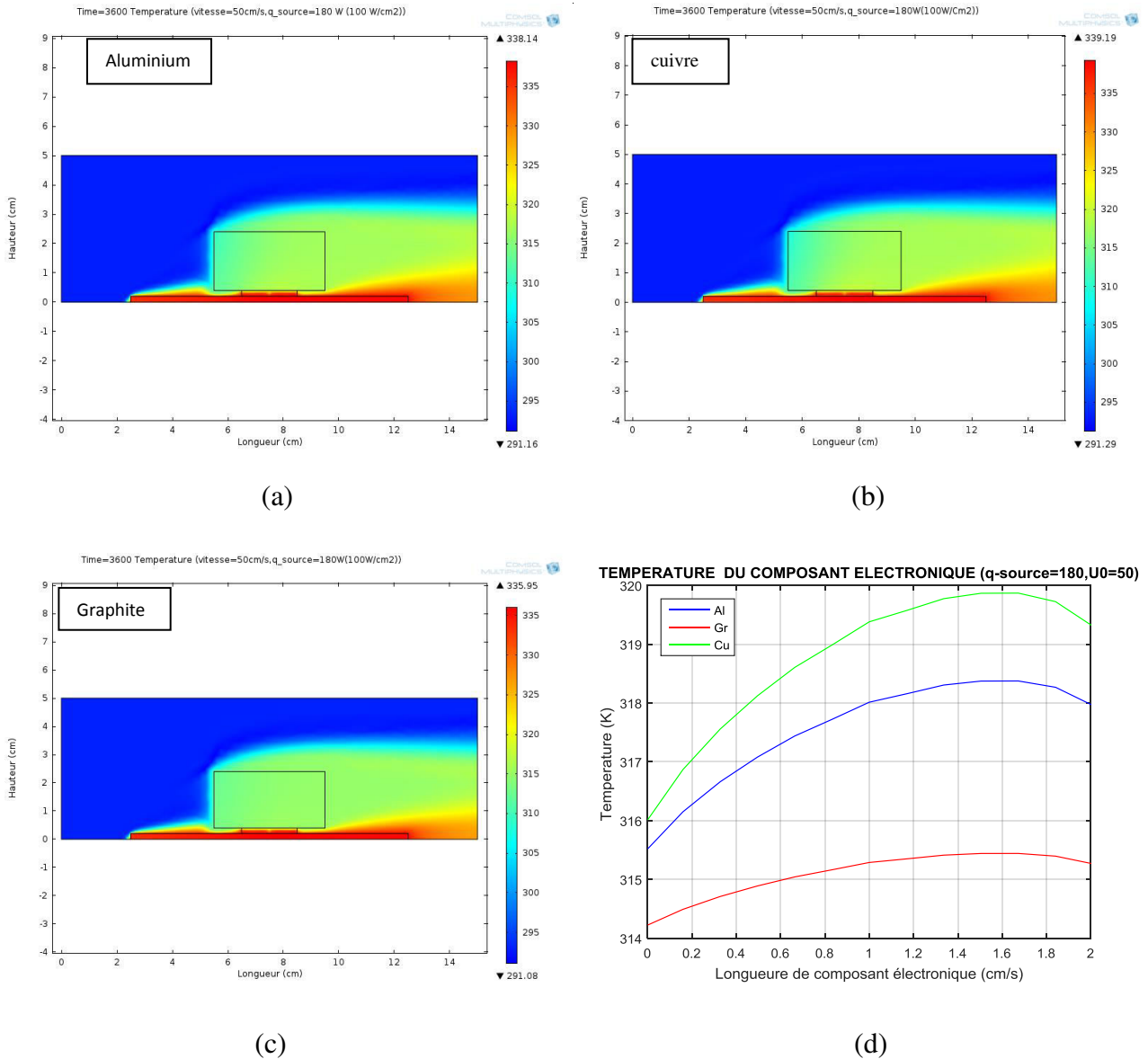
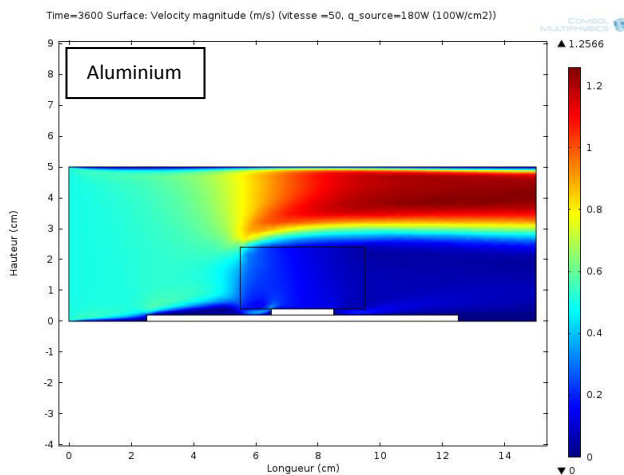


Figure III.16 : distribution de la température en 2D pour (a) l'aluminium, (b) le cuivre et (c) le graphite, (d) comparaison des profils des températures pour les trois métaux au niveau de l'interface composant-mousse métallique.

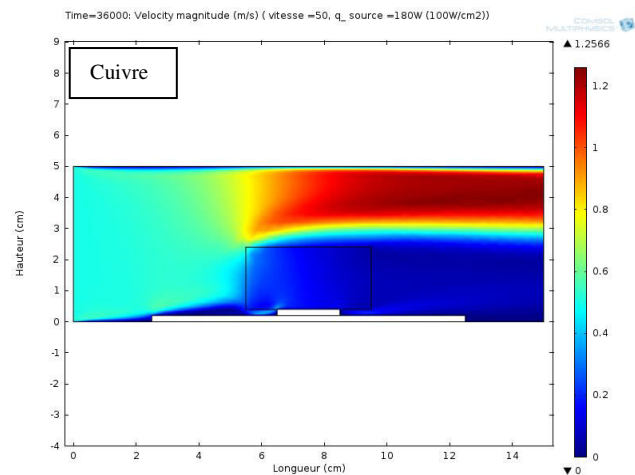
### III.5.14 Vitesses pour : $q_{\text{source}}=180 \text{ W}$ , $u_0=50 \text{ cm/s}$ et $t=3600 \text{ s}$

L'augmentation de la vitesse de l'air à l'entrée du canal à  $u_0=50 \text{ cm/s}$ , et pour la même valeur du flux thermique (figure III.17, a, b et c) présente les caractéristiques suivantes : l'amont du canal la vitesse de l'air est moyenne (elle est proche de  $0.5 \text{ m/s}$  pour les trois métaux) ainsi que le haut du canal loin du composant, tandis que l'aval du canal en haut, la vitesse de l'air est proche de  $1.2 \text{ m/s}$  pour les trois métaux (l'aluminium et le graphite, le cuivre). La vitesse au niveau de la mousse métallique est proche de  $0.2 \text{ m/s}$  pour les trois métaux.

La comparaison des profils des vitesses (figure III.17.d) montre la distribution de la vitesse de l'air au plan médian du canal incluant la région libre du canal occupé par l'air et la mousse. La vitesse de l'air au sein de la mousse du graphite est plus grande en comparaison avec celles du cuivre et de l'aluminium, cette vitesse moyenne est proche de  $16 \text{ cm/s}$ , alors que pour l'aluminium et le cuivre elle est proche de  $15 \text{ cm/s}$  pour les mêmes conditions d'écoulement.



(a)



(b)

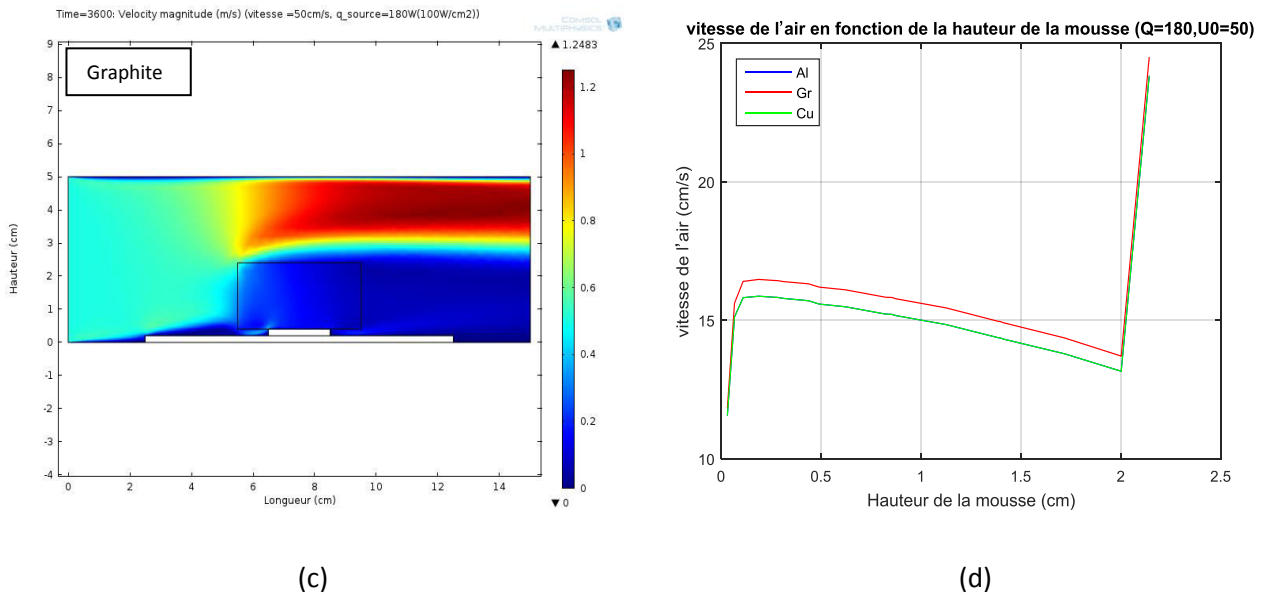


Figure III.17: distribution de la vitesse en 2D pour (a) l’aluminium, (b) le cuivre et (c) le graphite, (d) comparaison des profils des vitesses pour les trois métaux au niveau de centre de composant-mousse métallique.

**III.5.15 Températures pour :  $q_{source}=180\text{ W}$ ,  $u_0=70\text{ cm/s}$  et  $t=3600\text{ s}$**

L’effet de l’augmentation de la vitesse de l’air à l’entrée du canal à  $u_0=70\text{ cm/s}$  pour la même valeur du flux thermique présenté à la figure (III.18.a, b et c), montre un effet de chute de la température au sein du canal en comparaison avec celles pour  $u_0=50\text{ cm/s}$  et de  $u_0=50\text{ cm/s}$ ; l’amont du canal montre la température la plus basse (elle est proche de 295 K pour les trois métaux) ainsi que le haut du canal loin du composant, tandis que l’aval du canal et au niveau de la plaque la température est proche de 325 K pour le graphite, l’aluminium et le cuivre proche de 330 K La température au niveau de la mousse métallique est proche de 310 K pour les trois métaux

La comparaison des profils des températures (figure III.18.d) montre la distribution de la température à l’interface du composant-mousse métallique. La mousse en graphite permette de refroidir de mieux le composant à des températures moyennes proches de 308.5 K, celle en aluminium est proche de 310 K, alors que celle du cuivre est la plus haute pour ces conditions d’écoulement et elle est égale à 312 K.

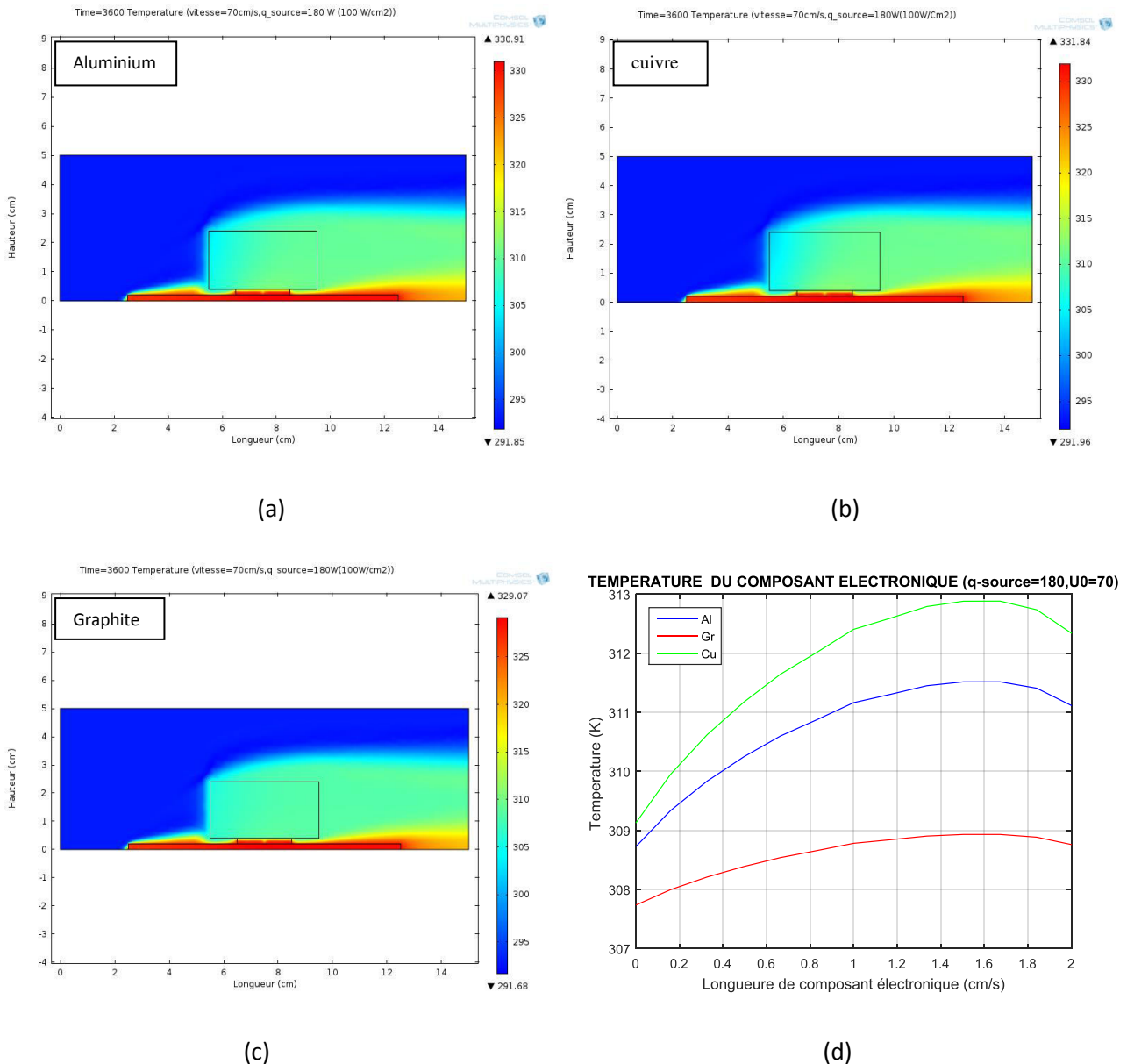


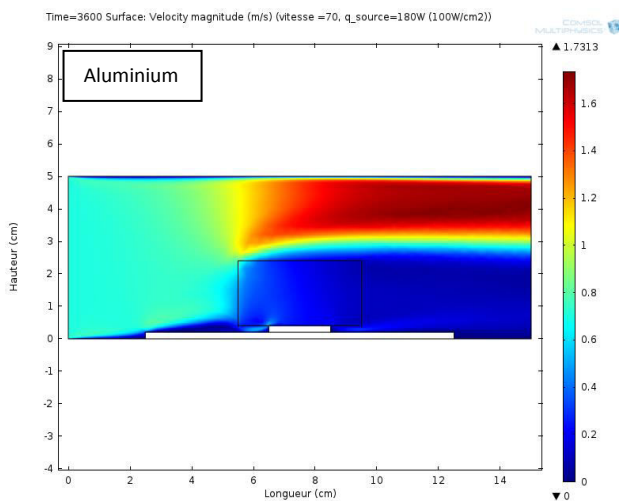
Figure III.18 : distribution de la température en 2D pour (a) l’aluminium, (b) le cuivre et (c) le graphite, (d) comparaison des profils des températures pour les trois métaux au niveau de l’interface composant-mousse métallique

**III.5.16 Vitesses pour :  $q_{source}=180\text{ W}$ ,  $u_0=70\text{ cm/s}$  et  $t=3600\text{ s}$**

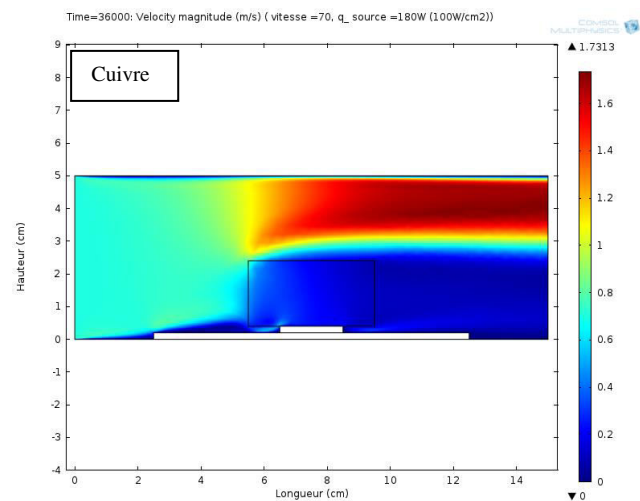
L’augmentation de la vitesse de l’air à l’entrée du canal à  $u_0=70\text{ cm/s}$ , et pour la même valeur du flux thermique (figure III.19, a, b et c) présente les caractéristiques suivantes : l’amont du canal la vitesse de l’air est moyenne (elle est proche de 0.7 m/s pour les trois métaux) ainsi que le haut du canal loin du composant, tandis que l’aval du canal en haut, la vitesse de l’air est proche de 1.6 m/s pour les trois métaux (l’aluminium et le graphite ,le

cuivre ). La vitesse au niveau de la mousse métallique est proche de 0.2 m/s pour les trois métaux.

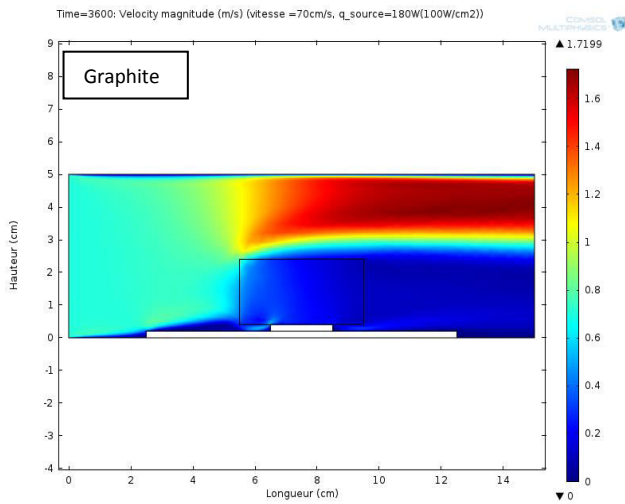
La comparaison des profils des vitesses (figure III.19.d) montre la distribution de la vitesse de l'air au plan médian du canal incluant la région libre du canal occupé par l'air et la mousse. La vitesse de l'air au sein de la mousse du graphite est plus grande en comparaison avec celles du cuivre et de l'aluminium, cette vitesse moyenne est proche de 23.5 cm/s, alors que pour l'aluminium et le cuivre elle est proche de 22.5 cm/s pour les mêmes conditions d'écoulement.



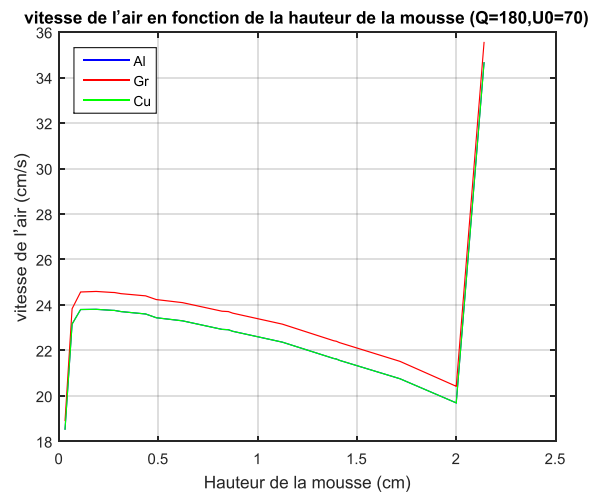
(a)



(b)



(c)



(d)

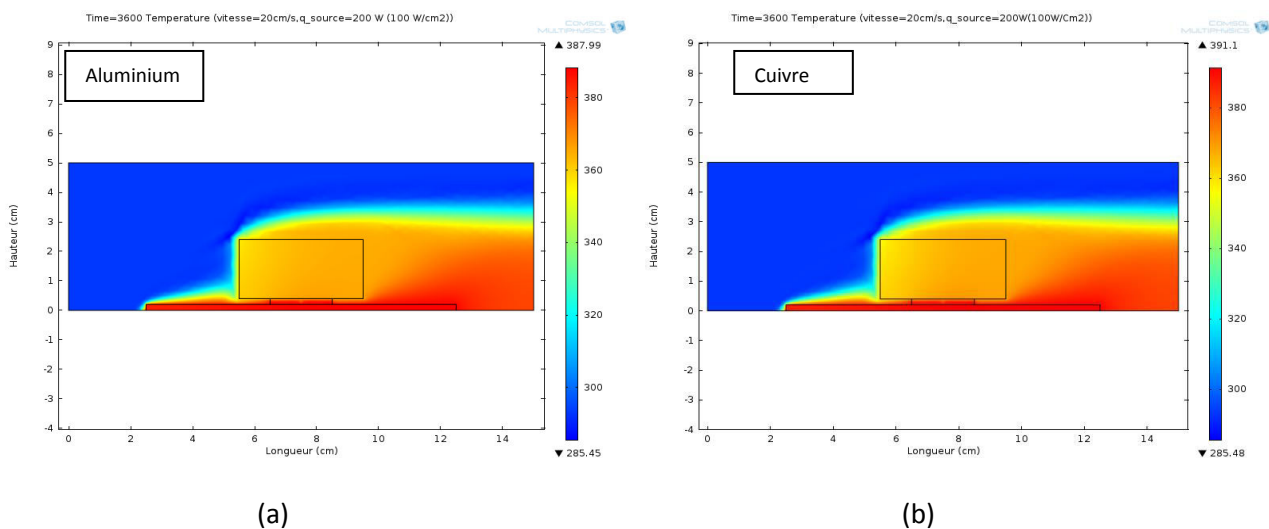
Figure III.19: distribution de la vitesse en 2D pour (a) l'aluminium, (b) le cuivre et (c) le graphite, (d) comparaison des profils des vitesses pour les trois métaux au niveau de centre de composant-mousse métallique.

### III.5.17 Températures pour : $q_{\text{source}}=200 \text{ W}$ , $u_0=20 \text{ cm/s}$ et $t=3600 \text{ s}$

Les figures (Figure III.20.a, b et c) représentent la distribution de la température en deux dimensions au sein du canal comportant la plaque et le composant électronique régi par un écoulement de l'air pour un régime transitoire correspondant à un temps d'écoulement  $t = 3600 \text{ s}$ . La figure (III.20.d) représente la comparaison des profils de température à l'interface composant-mousse métallique sous les mêmes conditions d'écoulement.

Sous les conditions d'un flux thermique imposé du composant égale à  $\phi = 200 \text{ W}$  et une vitesse de l'air à l'entrée du canal égale à  $u_0 = 20 \text{ cm/s}$ , la distribution de la température en 2D au sein du canal est caractérisée par : l'amont du canal montre la température la plus basse (elle est proche de  $300 \text{ K}$  pour les métaux : l'aluminium et le cuivre, et elle est proche de  $290 \text{ K}$  pour le graphite) ainsi que le haut du canal loin du composant, tandis que l'aval du canal et au niveau de la plaque la température est proche de  $380 \text{ K}$  pour les trois métaux. La température au niveau de la mousse métallique est proche de  $365 \text{ K}$  pour les trois métaux.

La comparaison des profils des températures (figure III.20.d) montre la distribution de la température à l'interface du composant-mousse métallique. La mousse en graphite permette de refroidir de mieux le composant à des températures moyennes proches de  $359 \text{ K}$ , celle en aluminium est proche de  $366 \text{ K}$ , alors que celle du cuivre est la plus haute pour ces conditions d'écoulement et elle est égale à  $368 \text{ K}$ .



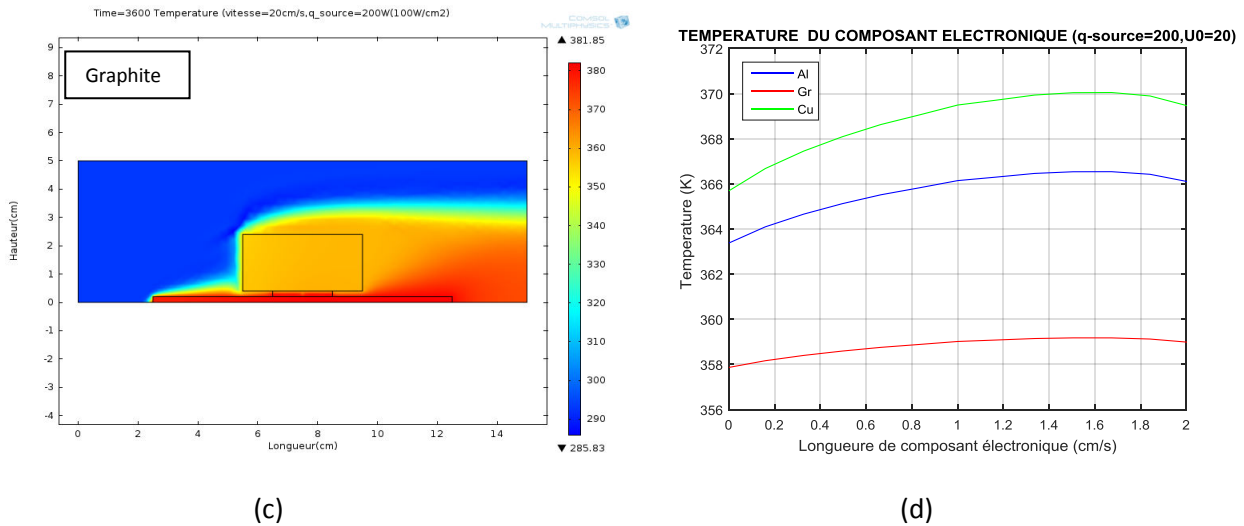


Figure III.20 : distribution de la température en 2D pour (a) l'aluminium, (b) le cuivre et (c) le graphite, (d) comparaison des profils des températures pour les trois métaux au niveau de l'interface composant-mousse métallique.

### III.5.18 Vitesses pour : $q_{\text{source}}=200 \text{ W}$ , $u_0=20 \text{ cm/s}$ et $t=3600 \text{ s}$

Les figures (Figure III.21.a, b et c) représentent la distribution de la vitesse en deux dimensions au sein du canal comportant la plaque et le composant électronique régi par un écoulement de l'air pour un régime transitoire correspondant à un temps d'écoulement  $t=3600 \text{ s}$ . La quatrième figure représente la comparaison des profils de la vitesse ou centre de composant-mousse métallique sous les mêmes conditions d'écoulement.

Sous les conditions d'un flux thermique imposé du composant égale à  $\phi = 200 \text{ W}$  et une vitesse de l'air à l'entrée du canal égale à  $u_0=20 \text{ cm/s}$ , la distribution de la vitesse en 2D au sein du canal est caractérisée par : en amont du canal la vitesse de l'air est moyenne (elle est proche de  $0.2 \text{ m/s}$  pour les trois métaux) ainsi que le haut du canal loin du composant, tandis que l'aval du canal en haut, la vitesse de l'air est proche de  $0.5 \text{ m/s}$  pour les trois métaux (l'aluminium et le graphite, le cuivre). La vitesse au niveau de la mousse métallique est proche de  $0.1 \text{ m/s}$  pour les trois métaux.

Pour une vitesse de l'air à l'entrée du canal  $u_0=20 \text{ cm/s}$  et un flux thermique global du composant  $\phi = 200 \text{ W}$ , La comparaison des profils des vitesses figurant à la quatrième figure montre la distribution de la vitesse de l'air au plan médian du canal incluant la région libre du canal occupé par l'air et la mousse. La vitesse de l'air au sein de la mousse du graphite est plus grande en comparaison avec celles du cuivre et de l'aluminium, cette

vitesse moyenne est proche de 4.7cm/s, alors que pour l'aluminium et le cuivre elle est proche de 4.4 cm/s pour les mêmes conditions d'écoulement.

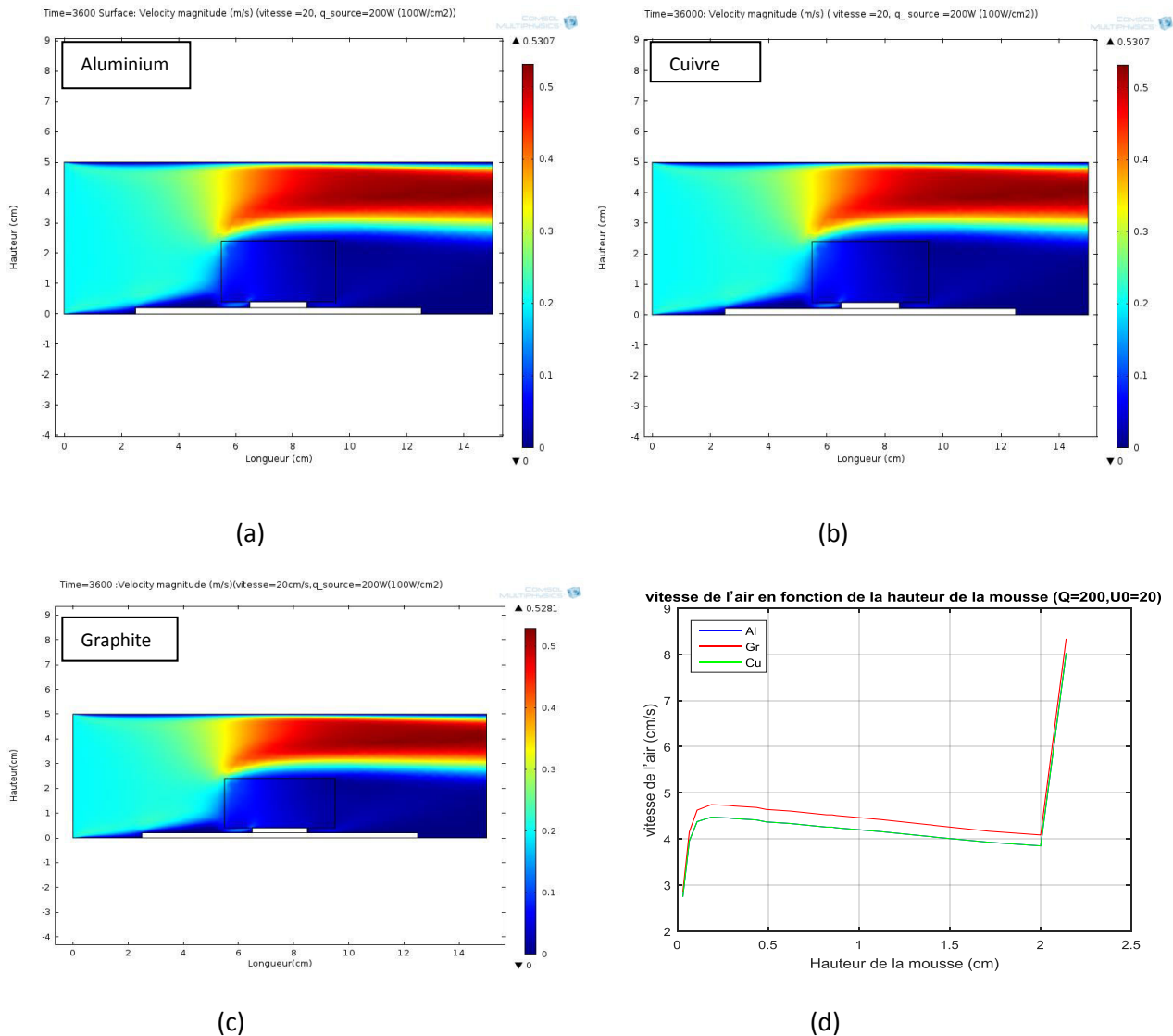


Figure III.21 : distribution de la vitesse en 2D pour (a) l'aluminium, (b) le cuivre et (c) le graphite, (d) comparaison des profils des vitesses pour les trois métaux au niveau de centre de composant-mousse métallique.

### III.5.19 Températures pour : $q_{source}=200$ W, $u_0=30$ cm/s et $t= 3600$ s

L'effet de l'augmentation de la vitesse de l'air à l'entrée du canal à  $u_0=30$  cm/s pour la même valeur du flux thermique présenté à la figure (III.22.a, b et c), montre un effet de chute de la température au sein du canal en comparaison avec celle pour  $u_0=20$  cm/s; l'amont du canal montre la température la plus basse (elle est proche de 290 K pour les trois métaux l'aluminium et le cuivre, le graphite) ainsi que le haut du canal loin du composant, tandis que l'aval du canal et au niveau de la plaque la température est proche de 380 K pour

les trois métaux. La température au niveau de la mousse métallique est proche de 335 K pour les deux métaux l'aluminium et le cuivre et de 355 K pour le graphite.

La comparaison des profils des températures (figure III.22.d) montre la distribution de la température à l'interface du composant-mousse métallique. La mousse en graphite permet de refroidir de mieux le composant à des températures moyennes proches de 336 K, celle en aluminium est proche de 339 K, alors que celle du cuivre est la plus haute pour ces conditions d'écoulement et elle est égale à 342 K.

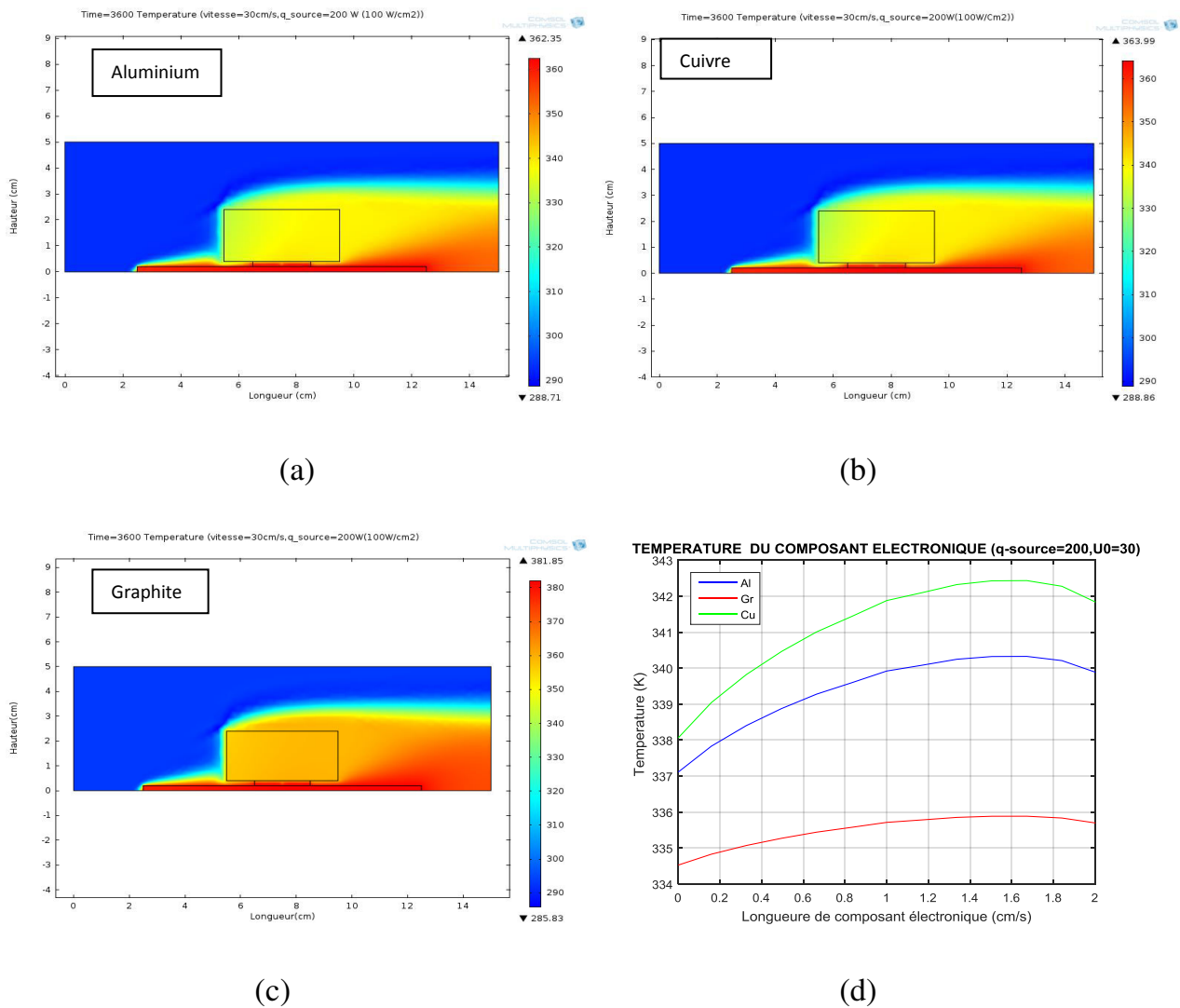
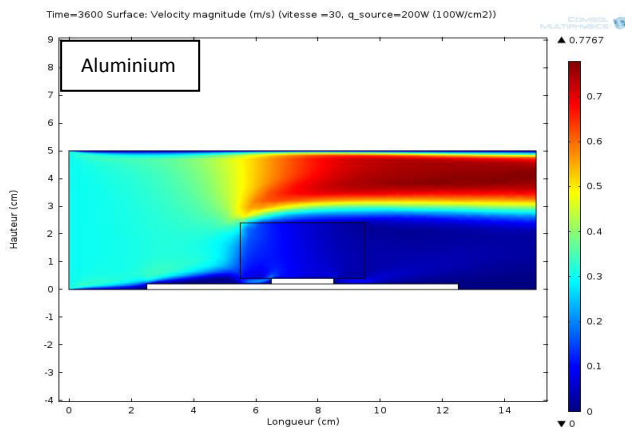


Figure III.22 : distribution de la température en 2D pour (a) l'aluminium, (b) le cuivre et (c) le graphite, (d) comparaison des profils des températures pour les trois métaux au niveau de l'interface composant-mousse métallique.

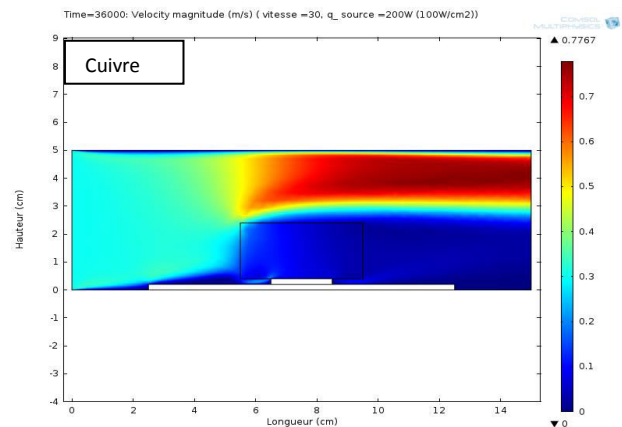
### III.5.20 Vitesses pour : $q_{\text{source}}=200 \text{ W}$ , $u_0=30 \text{ cm/s}$ et $t=3600 \text{ s}$

L'augmentation de la vitesse de l'air à l'entrée du canal à  $u_0=30 \text{ cm/s}$ , et pour la même valeur du flux thermique (figure III.23, a, b et c) présente les caractéristiques suivantes : en amont du canal la vitesse de l'air est moyenne (elle est proche de  $0.3 \text{ m/s}$  pour les deux métaux l'aluminium et le cuivre, et le graphite  $0.2 \text{ m/s}$ ) ainsi que le haut du canal loin du composant, tandis que l'aval du canal en haut, la vitesse de l'air est proche de  $0.7 \text{ m/s}$  pour l'aluminium et le cuivre, et elle est proche de  $0.5 \text{ m/s}$  pour le graphite. La vitesse au niveau de la mousse métallique est proche de  $0.1 \text{ m/s}$  pour les trois métaux.

La comparaison des profils des vitesses (figure III.23.d) montre la distribution de la vitesse de l'air au plan médian du canal incluant la région libre du canal occupé par l'air et la mousse. La vitesse de l'air au sein de la mousse du graphite est plus grande en comparaison avec celles du cuivre et de l'aluminium, cette vitesse moyenne est proche de  $8.4 \text{ cm/s}$ , alors que pour l'aluminium et le cuivre elle est proche de  $8 \text{ cm/s}$  pour les mêmes conditions d'écoulement.



(a)



(b)

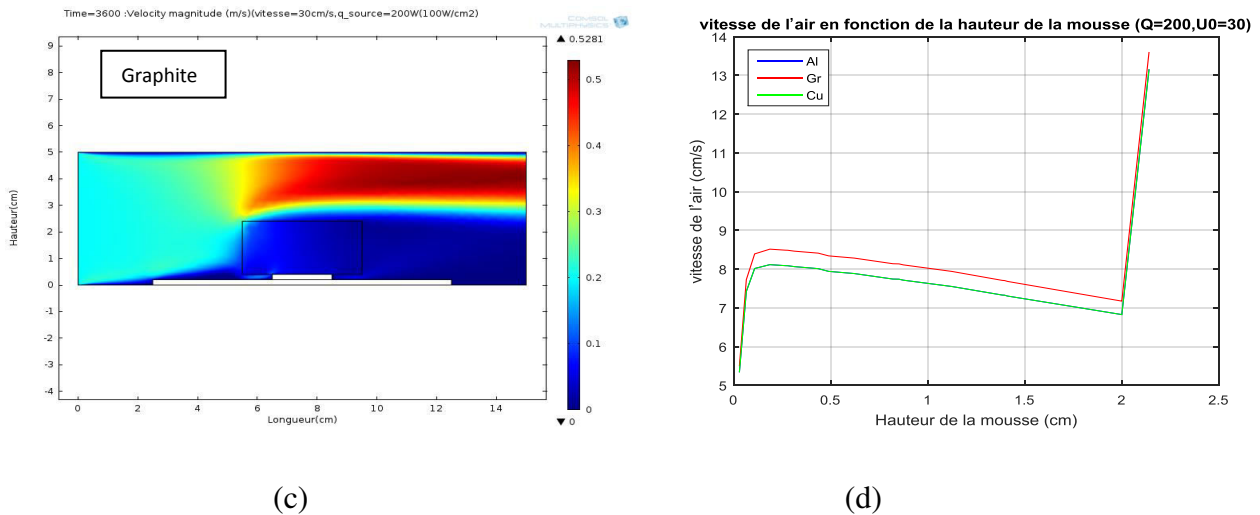


Figure III.23 : distribution de la vitesse en 2D pour (a) l'aluminium, (b) le cuivre et (c) le graphite, (d) comparaison des profils des vitesses pour les trois métaux au niveau de composant-mousse métallique.

### III.5.21 Températures pour : $q_{\text{source}}=200 \text{ W}$ , $u_0=50 \text{ cm/s}$ et $t=3600 \text{ s}$

L'effet de l'augmentation de la vitesse de l'air à l'entrée du canal à  $u_0=50 \text{ cm/s}$  pour la même valeur du flux thermique présenté à la figure (III.24.a, b et c), montre un effet de chute de la température au sein du canal en comparaison avec celles pour  $u_0=20 \text{ cm/s}$  et de  $u_0=30 \text{ cm/s}$ ; l'amont du canal montre la température la plus basse (elle est proche de 300 K pour les métaux : l'aluminium et le cuivre, et elle est proche de 295 K pour le graphite) ainsi que le haut du canal loin du composant, tandis que l'aval du canal et au niveau de la plaque la température est proche de 340 K pour les trois métaux. La température au niveau de la mousse métallique est proche de 320 K pour les trois métaux.

La comparaison des profils des températures (figure III.24.d) montre la distribution de la température à l'interface du composant-mousse métallique. La mousse en graphite permet de refroidir de mieux le composant à des températures moyennes proches de 318 K, celle en aluminium est proche de 320 K, alors que celle du cuivre est la plus haute pour ces conditions d'écoulement et elle est égale à 322 K.

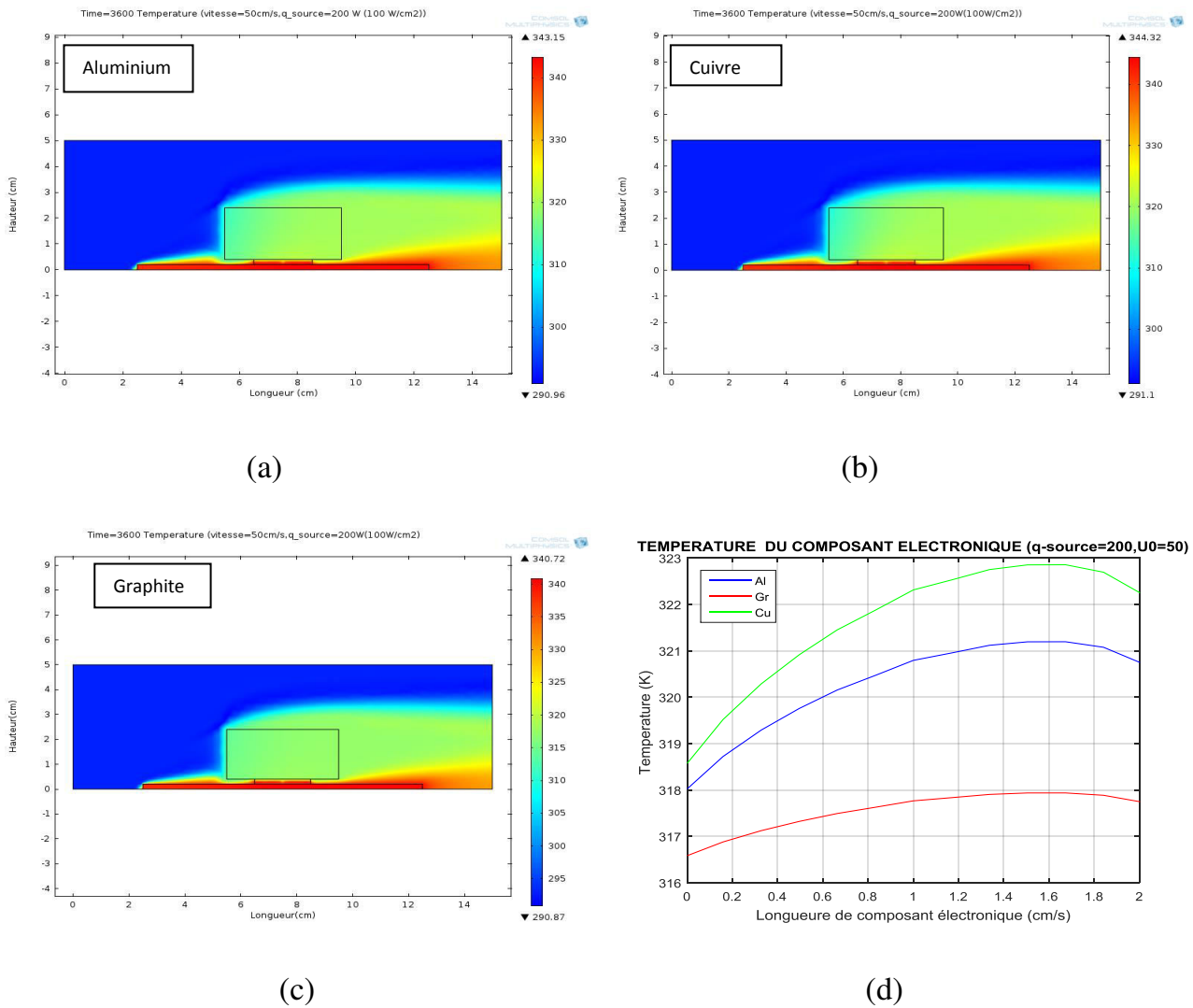


Figure III.24 : distribution de la température en 2D pour (a) l’aluminium, (b) le cuivre et (c) le graphite, (d) comparaison des profils des températures pour les trois métaux au niveau de l’interface composant-mousse métallique.

**III.5.22 Vitesses pour :  $q_{source}=200\text{ W}$ ,  $u_0=50\text{ cm/s}$  et  $t=3600\text{ s}$**

L’augmentation de la vitesse de l’air à l’entrée du canal à  $u_0=50\text{ cm/s}$ , et pour la même valeur du flux thermique (figure III.25, a, b et c) présente les caractéristiques suivantes : en amont du canal la vitesse de l’air est moyenne (elle est proche de  $0.5\text{ m/s}$  pour les trois métaux l’aluminium et le cuivre, et le graphite) ainsi que le haut du canal loin du composant, tandis que l’aval du canal en haut, la vitesse de l’air est proche de  $1.2\text{ m/s}$  pour les trois métaux. La vitesse au niveau de la mousse métallique est proche de  $0.1\text{ m/s}$  pour les trois métaux.

La comparaison des profils des vitesses (figure III.25.d) montre la distribution de la vitesse de l’air au plan médian du canal incluant la région libre du canal occupé par l’air et

la mousse. La vitesse de l'air au sein de la mousse du graphite est plus grande en comparaison avec celles du cuivre et de l'aluminium, cette vitesse moyenne est proche de 15.4 cm/s, alors que pour l'aluminium et le cuivre elle est proche de 15.2 cm/s pour les mêmes conditions d'écoulement.

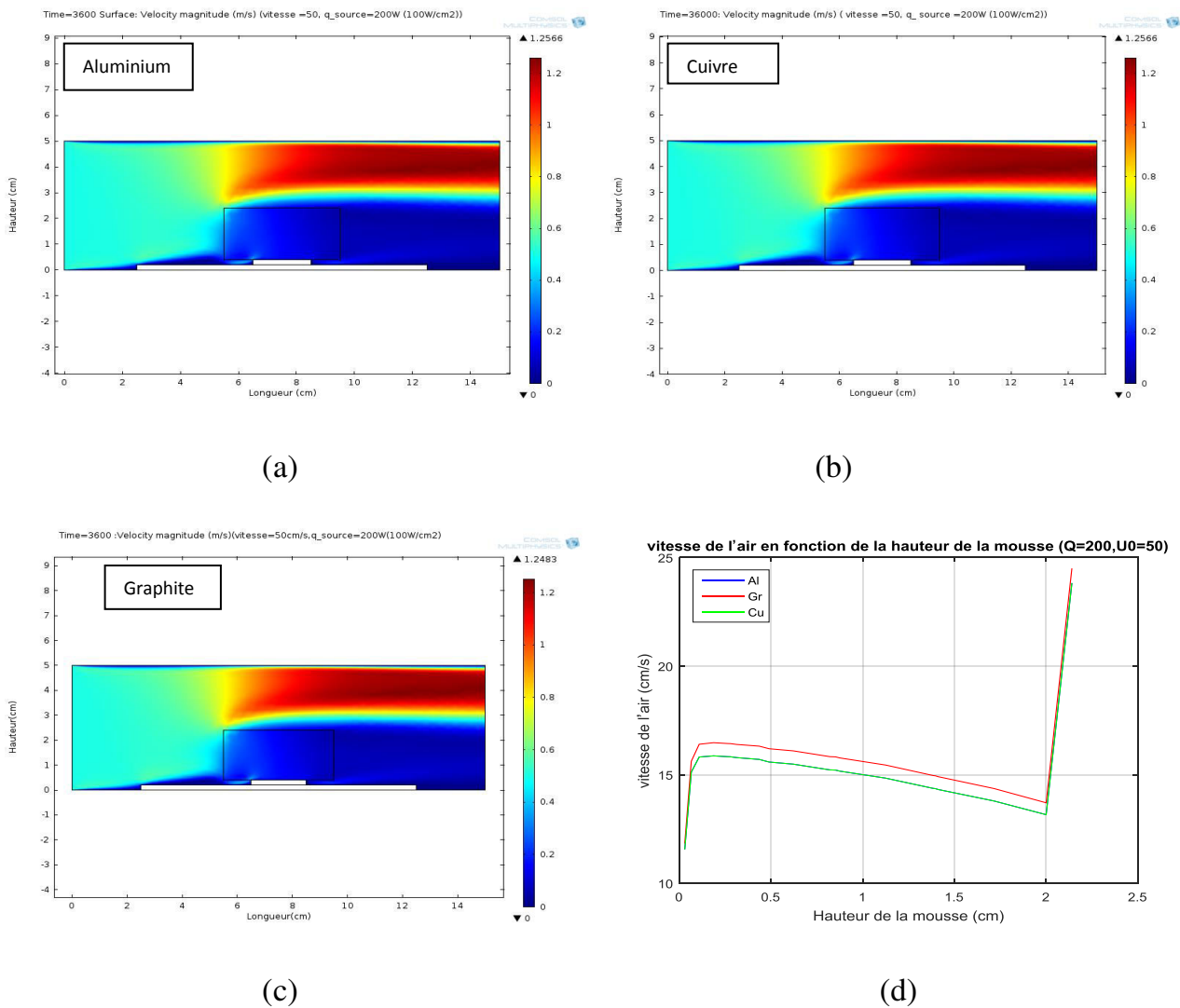


Figure III.25 : distribution de la vitesse en 2D pour (a) l'aluminium, (b) le cuivre et (c) le graphite, (d) comparaison des profils des vitesses pour les trois métaux au niveau de composant-mousse métallique.

### III.5.23 Températures pour : $q_{\text{source}}=200 \text{ W}$ , $u_0=70 \text{ cm/s}$ et $t=3600 \text{ s}$

L'effet de l'augmentation de la vitesse de l'air à l'entrée du canal à  $u_0=70 \text{ cm/s}$  pour la même valeur du flux thermique présenté à la figure (III.26.a, b et c), montre un effet de chute de la température au sein du canal en comparaison avec celles pour  $u_0=50 \text{ cm/s}$  et de  $u_0=30 \text{ cm/s}$ ; l'amont du canal montre la température la plus basse (elle est proche de 295 K pour les trois métaux (l'aluminium et le cuivre, et le graphite) ainsi que le haut du canal

loin du composant, tandis que l’aval du canal et au niveau de la plaque la température est proche de 335 K pour l’aluminium et le cuivre et 330 K pour le graphite . La température au niveau de la mousse métallique est proche de 310 K pour les trois métaux.

La comparaison des profils des températures (figure III.26.d) montre la distribution de la température à l’interface du composant-mousse métallique. La mousse en graphite permette de refroidir de mieux le composant à des températures moyennes proches de 310 K, celle en aluminium est proche de 311 K, alors que celle du cuivre est la plus haute pour ces conditions d’écoulement et elle est égale à 314 K.

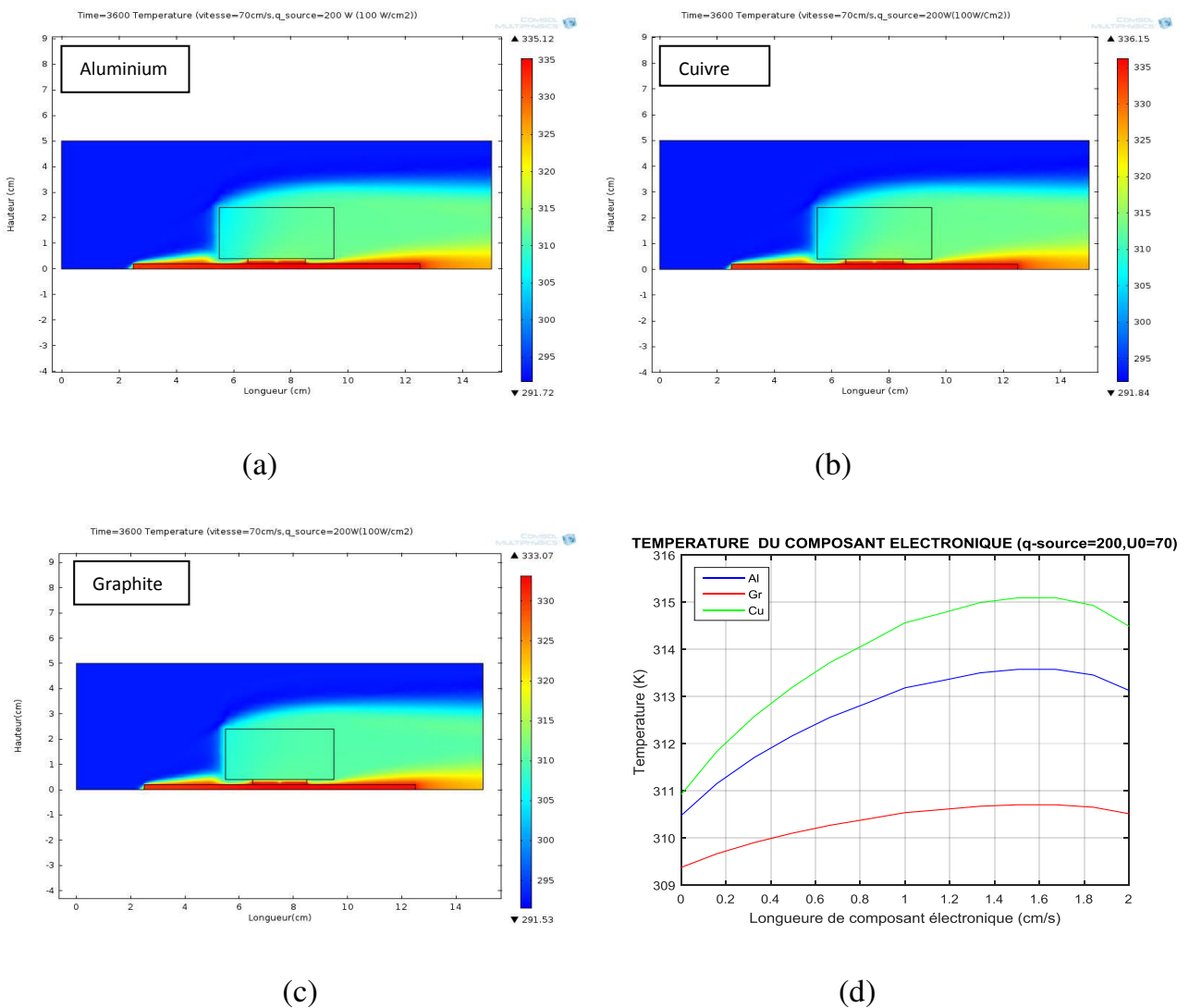
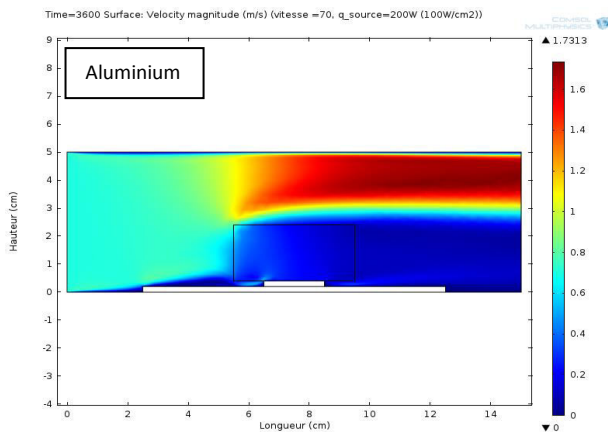


Figure III.26 : distribution de la température en 2D pour (a) l’aluminium, (b) le cuivre et (c) le graphite, (d) comparaison des profils des températures pour les trois métaux au niveau de l’interface composant-mousse métallique.

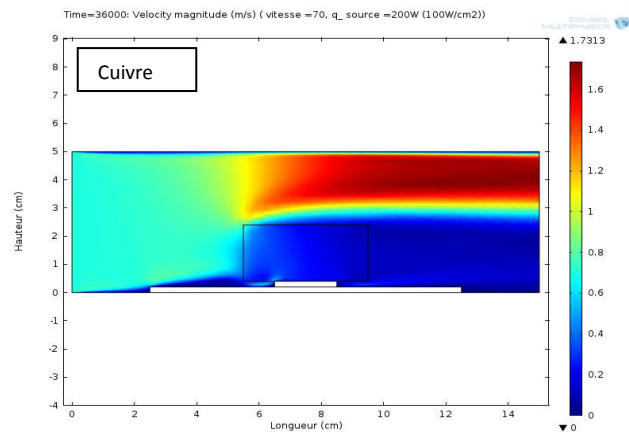
### III.5.24 Vitesses pour : $q_{\text{source}}=200 \text{ W}$ , $u_0=70 \text{ cm/s}$ et $t=3600 \text{ s}$

L'augmentation de la vitesse de l'air à l'entrée du canal à  $u_0=70 \text{ cm/s}$ , et pour la même valeur du flux thermique (figure III.27, a, b et c) présente les caractéristiques suivantes : en amont du canal la vitesse de l'air est moyenne (elle est proche de  $0.7 \text{ m/s}$  pour les trois métaux l'aluminium et le cuivre, et le graphite) ainsi que le haut du canal loin du composant, tandis que l'aval du canal en haut, la vitesse de l'air est proche de  $1.6 \text{ m/s}$  pour les trois métaux. La vitesse au niveau de la mousse métallique est proche de  $0.2 \text{ m/s}$  pour les trois métaux.

La comparaison des profils des vitesses (figure III.27.d) montre la distribution de la vitesse de l'air au plan médian du canal incluant la région libre du canal occupé par l'air et la mousse. La vitesse de l'air au sein de la mousse du graphite est plus grande en comparaison avec celles du cuivre et de l'aluminium, cette vitesse moyenne est proche de  $24.2 \text{ cm/s}$ , alors que pour l'aluminium et le cuivre elle est proche de  $23.9 \text{ cm/s}$  pour les mêmes conditions d'écoulement.



(a)



(b)

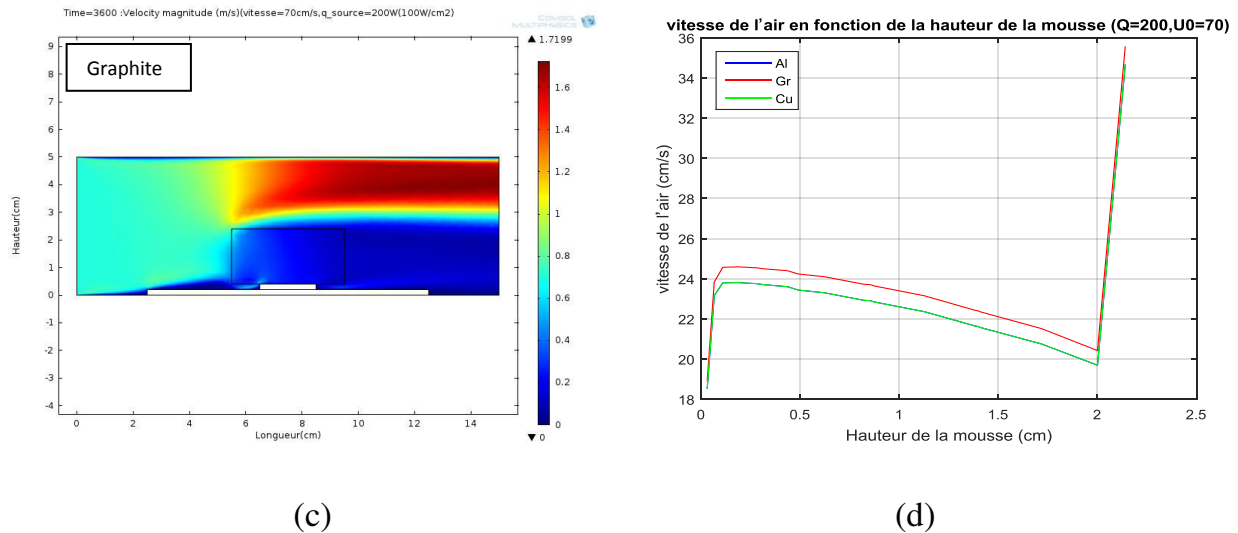


Figure III.27 : distribution de la vitesse en 2D pour (a) l'aluminium, (b) le cuivre et (c) le graphite, (d) comparaison des profils des vitesses pour les trois métaux au niveau de composant-mousse métallique.

### III.5.25 Températures pour : $q_{\text{source}}=220 \text{ W}$ , $u_0=20 \text{ cm/s}$ et $t=3600 \text{ s}$

Les figures (Figure III.28.a, b et c) représentent la distribution de la température en deux dimensions au sein du canal comportant la plaque et le composant électronique régi par un écoulement de l'air pour un régime transitoire correspondant à un temps d'écoulement  $t=3600 \text{ s}$ . La figure (III.28.d) représente la comparaison des profils de température à l'interface composant-mousse métallique sous les mêmes conditions d'écoulement.

Sous les conditions d'un flux thermique imposé du composant égale à  $\phi = 200 \text{ W}$  et une vitesse de l'air à l'entrée du canal égale à  $u_0=20 \text{ cm/s}$ , la distribution de la température en 2D au sein du canal est caractérisée par : l'amont du canal montre la température la plus basse (elle est proche de  $300 \text{ K}$  pour les trois métaux ( l'aluminium et le cuivre , et le graphite ) ainsi que le haut du canal loin du composant, tandis que l'aval du canal et au niveau de la plaque la température est proche de  $397 \text{ K}$  pour l'aluminium et le cuivre et  $400 \text{ K}$  pour le graphite . La température au niveau de la mousse métallique est proche de  $365 \text{ K}$  pour les trois métaux.

La comparaison des profils des températures (figure III.28.d) montre la distribution de la température à l'interface du composant-mousse métallique. La mousse en graphite permette de refroidir de mieux le composant à des températures moyennes proches de  $312 \text{ K}$ , celle en aluminium est proche de  $314 \text{ K}$ , alors que celle du cuivre est la plus haute pour ces conditions d'écoulement et elle est égale à  $316 \text{ K}$ .

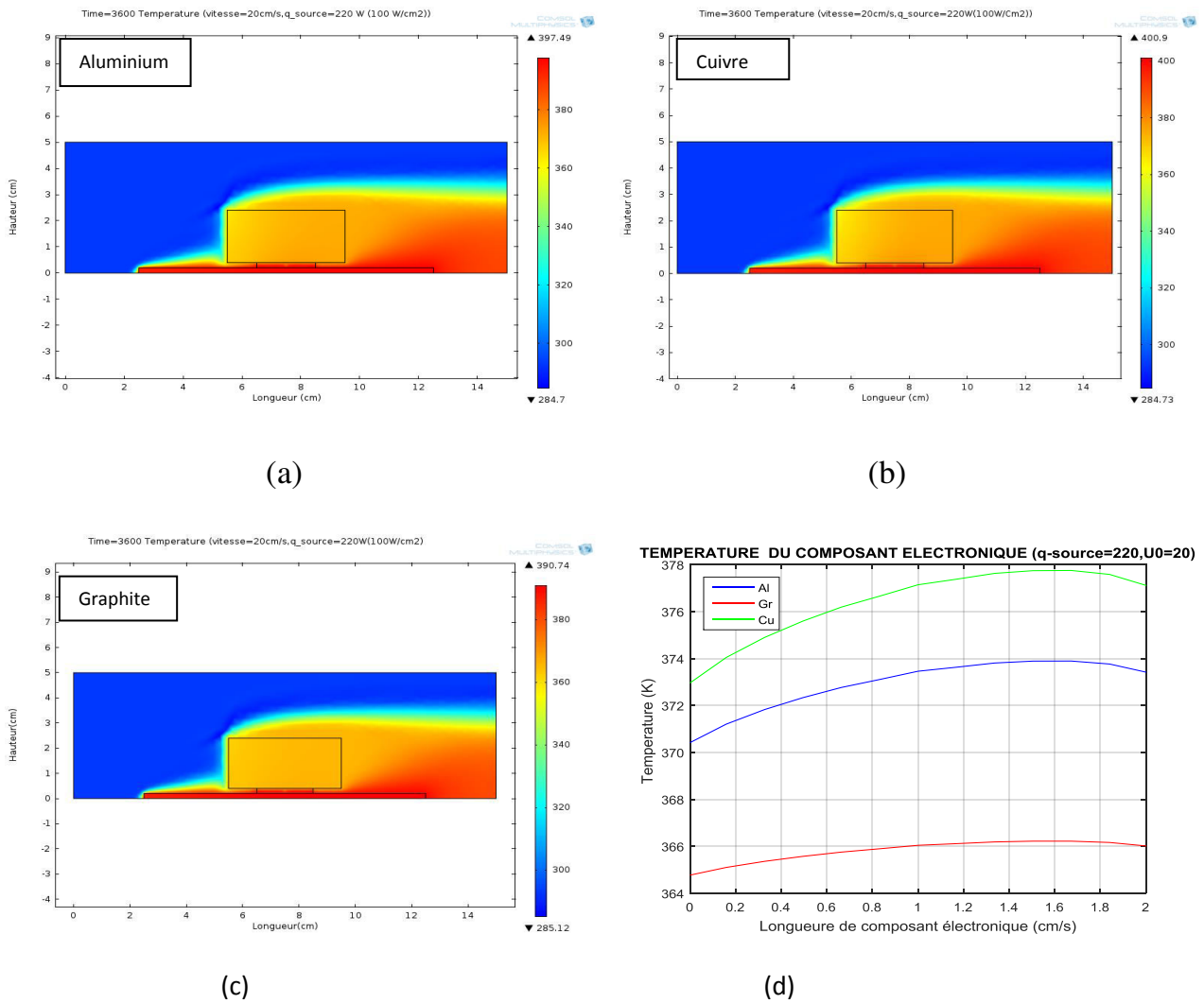


Figure III.28: distribution de la température en 2D pour (a) l’aluminium, (b) le cuivre et (c) le graphite, (d) comparaison des profils des températures pour les trois métaux au niveau de l’interface composant-mousse métallique.

**III.5.26 Vitesses pour :  $q_{source}=220\text{ W}$ ,  $u_0=20\text{ cm/s}$  et  $t=3600\text{ s}$**

Les figures (Figure III.29.a, b et c) représentent la distribution de la vitesse en deux dimensions au sein du canal comportant la plaque et le composant électroniques régi par un écoulement de l’air pour un régime transitoire correspondant à un temps d’écoulement  $t=3600\text{ s}$ . La quatrième figure représente la comparaison des profils de la vitesse au centre de composant-mousse métallique sous les mêmes conditions d’écoulement.

Sous les conditions d’un flux thermique imposé du composant égale à  $\phi = 220\text{ W}$  et une vitesse de l’air à l’entrée du canal égale à  $u_0=20\text{ cm/s}$ , la distribution de la vitesse en 2D au sein du canal est caractérisée par : en amont du canal la vitesse de l’air est moyenne (elle est proche de  $0.2\text{ m/s}$  pour les trois métaux l’aluminium et le cuivre, et le graphite) ainsi que le haut du canal loin du composant, tandis que l’aval du canal en haut, la vitesse de l’air

est proche de 0.5 m/s pour les trois métaux . La vitesse au niveau de la mousse métallique est proche de 0.1 m/s pour les trois métaux.

Pour une vitesse de l'air à l'entrée du canal  $u_0 = 20 \text{ cm/s}$  et un flux thermique global du composant  $\phi = 220 \text{ W}$ , La comparaison des profils des vitesses figurant à la quatrième figure montre la distribution de la vitesse de l'air au plan médian du canal incluant la région libre du canal occupé par l'air et la mousse. La vitesse de l'air au sein de la mousse du graphite est plus grande en comparaison avec celles du cuivre et de l'aluminium, cette vitesse moyenne est proche de 4.5cm/s, alors que pour l'aluminium et le cuivre elle est proche de 4.2 cm/s pour les mêmes conditions d'écoulement.

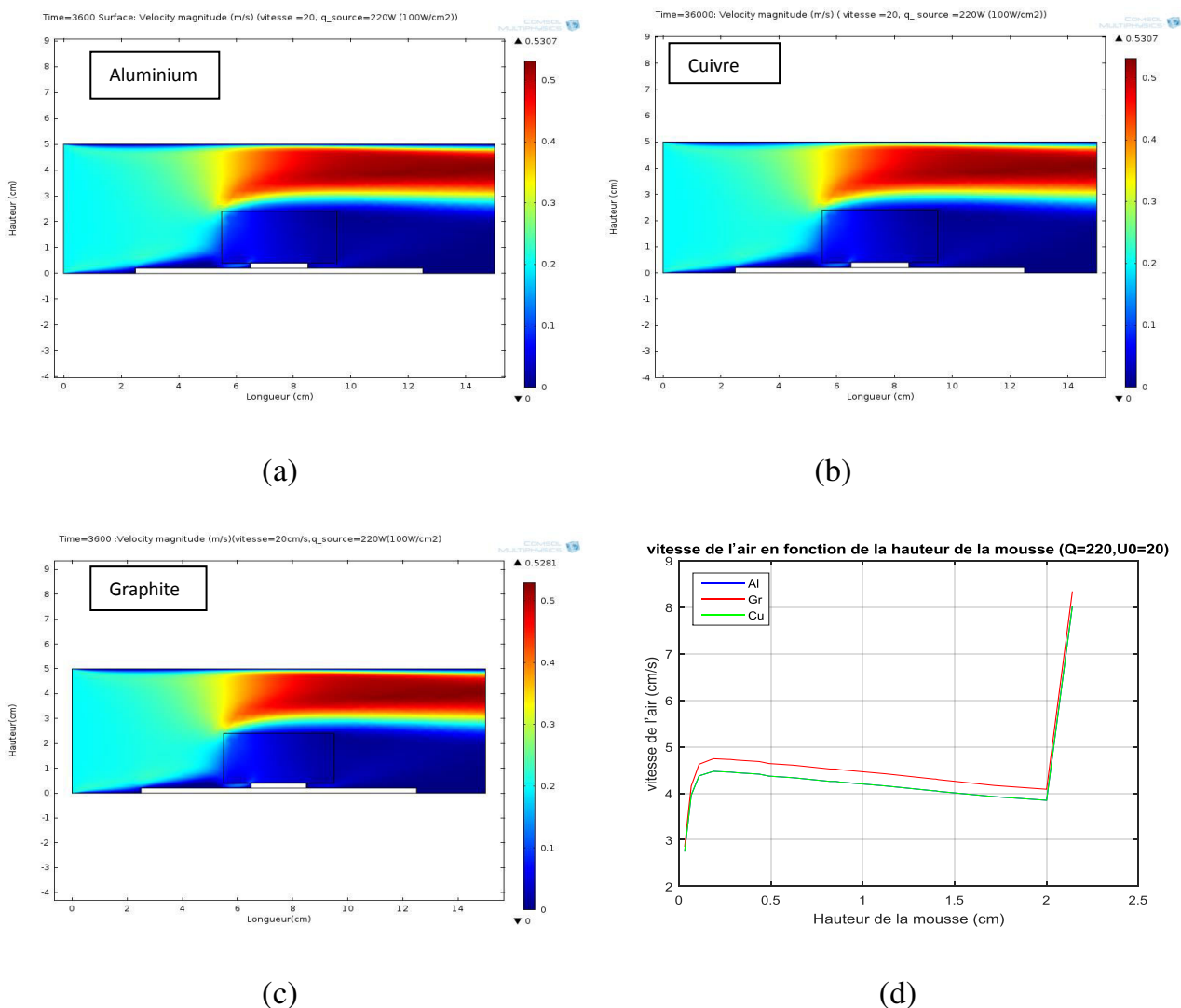
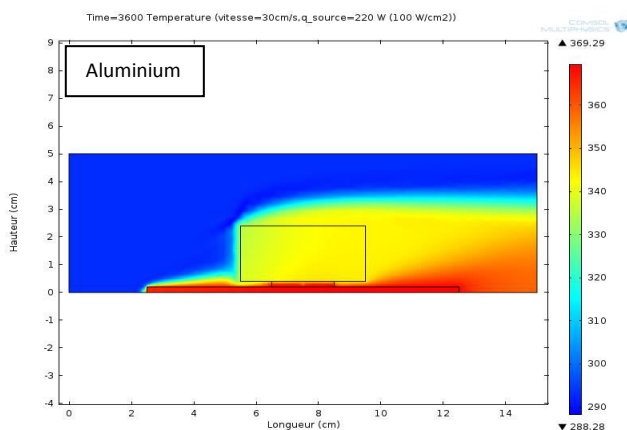


Figure III.29 : distribution de la vitesse en 2D pour (a) l'aluminium, (b) le cuivre et (c) le graphite, (d) comparaison des profils des vitesses pour les trois métaux au niveau de composant-mousse métallique.

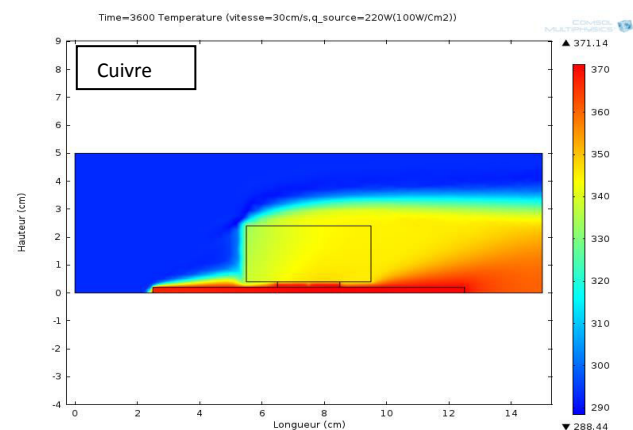
### III.5.27 Températures pour : $q_{\text{source}}=220 \text{ W}$ , $u_0=30 \text{ cm/s}$ et $t=3600 \text{ s}$

L'effet de l'augmentation de la vitesse de l'air à l'entrée du canal à  $u_0=30 \text{ cm/s}$  pour la même valeur du flux thermique présenté à la figure (III.30.a, b et c), montre un effet de chute de la température au sein du canal en comparaison avec celle pour  $u_0=20 \text{ cm/s}$ ; l'amont du canal montre la température la plus basse (elle est proche de  $300 \text{ K}$  pour les trois métaux (l'aluminium et le cuivre, et le graphite) ainsi que le haut du canal loin du composant, tandis que l'aval du canal et au niveau de la plaque la température est proche de  $360 \text{ K}$  pour l'aluminium et le graphite et  $370 \text{ K}$  pour le cuivre. La température au niveau de la mousse métallique est proche de  $340 \text{ K}$  pour les trois métaux.

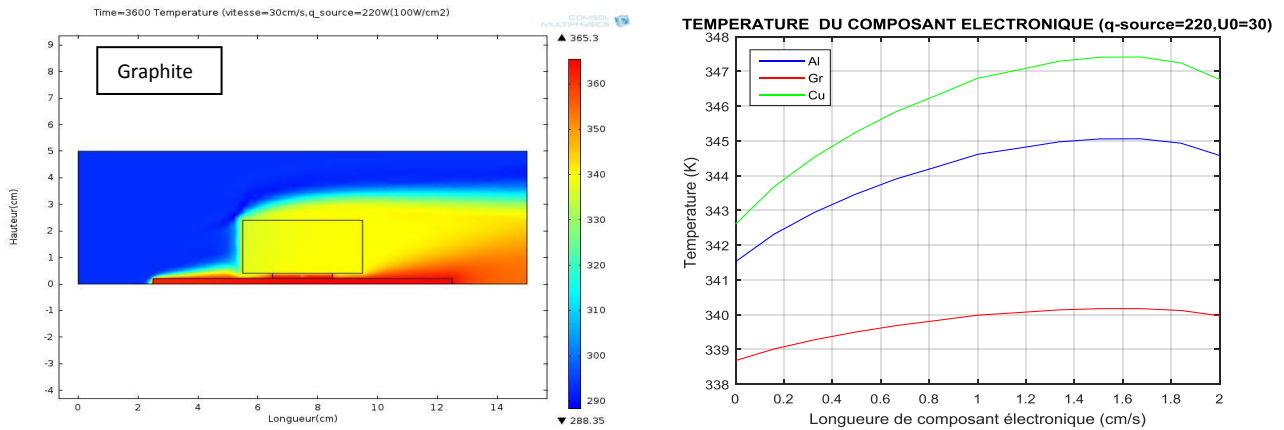
La comparaison des profils des températures (figure III.30.d) montre la distribution de la température à l'interface du composant-mousse métallique. La mousse en graphite permet de refroidir de mieux le composant à des températures moyennes proches de  $339 \text{ K}$ , celle en aluminium est proche de  $344 \text{ K}$ , alors que celle du cuivre est la plus haute pour ces conditions d'écoulement et elle est égale à  $346 \text{ K}$ .



(a)



(b)



(c)

(d)

Figure III.30 : distribution de la température en 2D pour (a) l'aluminium, (b) le cuivre et (c) le graphite, (d) comparaison des profils des températures pour les trois métaux au niveau de l'interface composant-mousse métallique.

### III.5.28 Vitesses pour : $q_{\text{source}}=220$ W, $u_0=30$ cm/s et $t=3600$ s

L'augmentation de la vitesse de l'air à l'entrée du canal à  $u_0=30$  cm/s, et pour la même valeur du flux thermique (figure III.31, a, b et c) présente les caractéristiques suivantes : en amont du canal la vitesse de l'air est moyenne (elle est proche de 0.3 m/s pour les trois métaux l'aluminium et le cuivre, et le graphite) ainsi que le haut du canal loin du composant, tandis que l'aval du canal en haut, la vitesse de l'air est proche de 0.7 m/s pour les trois métaux. La vitesse au niveau de la mousse métallique est proche de 0.1 m/s pour les trois métaux.

La comparaison des profils des vitesses (figure III.31.d) montre la distribution de la vitesse de l'air au plan médian du canal incluant la région libre du canal occupé par l'air et la mousse. La vitesse de l'air au sein de la mousse du graphite est plus grande en comparaison avec celles du cuivre et de l'aluminium, cette vitesse moyenne est proche de 8.4 cm/s, alors que pour l'aluminium et le cuivre elle est proche de 8 cm/s pour les mêmes conditions d'écoulement.

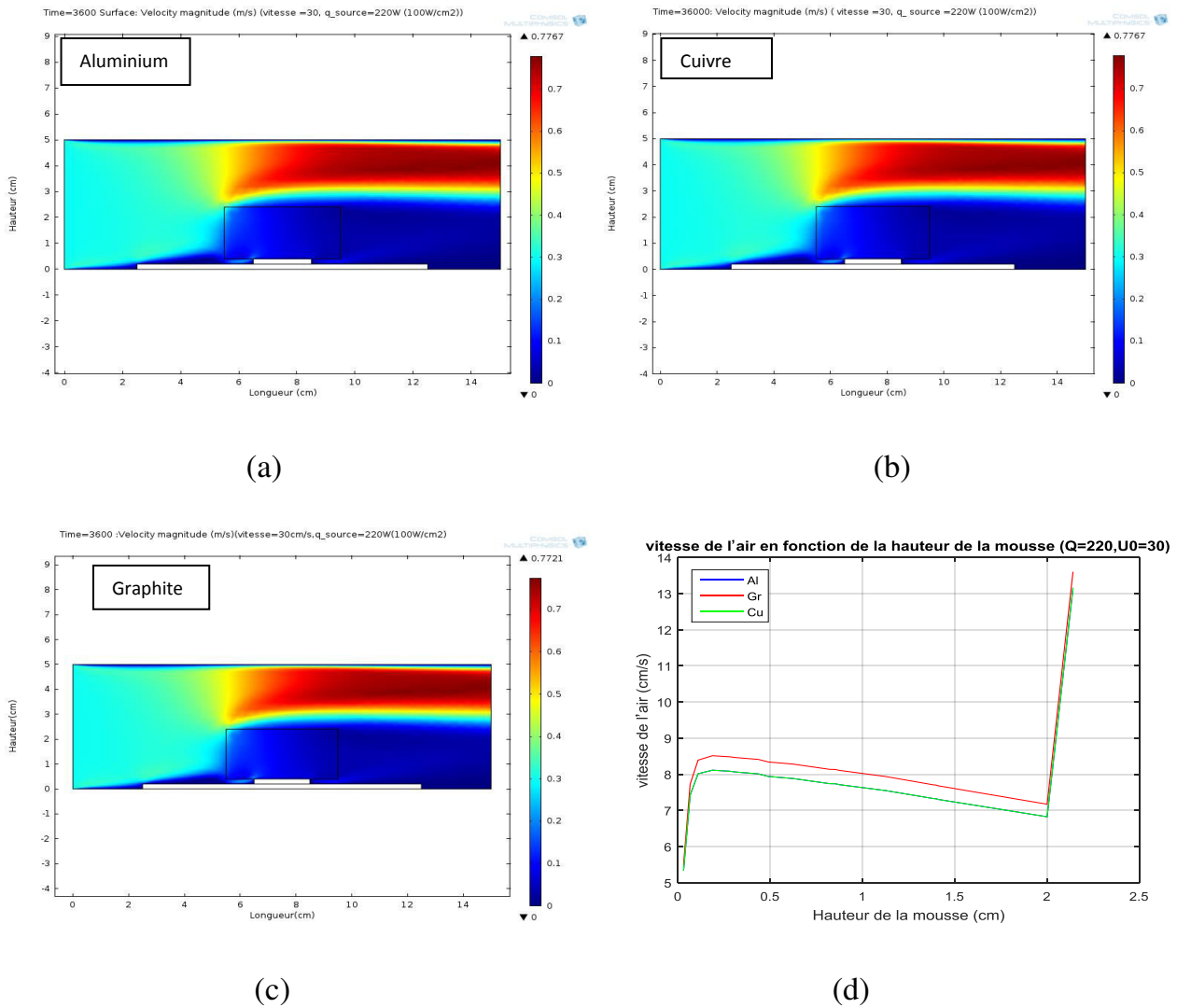


Figure III.31 : distribution de la vitesse en 2D pour (a) l’aluminium, (b) le cuivre et (c) le graphite, (d) comparaison des profils des vitesses pour les trois métaux au niveau de composant-mousse métallique.

**III.5.29 Températures pour :  $q_{source}=220\text{ W}$ ,  $u_0=50\text{ cm/s}$  et  $t=3600\text{ s}$**

L’effet de l’augmentation de la vitesse de l’air à l’entrée du canal à  $u_0=50\text{ cm/s}$  pour la même valeur du flux thermique présenté à la figure (III.32.a, b et c), montre un effet de chute de la température au sein du canal en comparaison avec celles pour  $u_0=20\text{ cm/s}$  et de  $u_0=30\text{ cm/s}$ ; l’amont du canal montre la température la plus basse (elle est proche de 300 K pour les trois métaux ( l’aluminium et le cuivre , et le graphite ) ainsi que le haut du canal loin du composant, tandis que l’aval du canal et au niveau de la plaque la température est proche de 340 K pour l’aluminium et le cuivre. La température au niveau de la mousse métallique est proche de 320 K pour les trois métaux.

La comparaison des profils des températures (figure III.32.d) montre la distribution de la température à l'interface du composant-mousse métallique. La mousse en graphite permet de refroidir de mieux le composant à des températures moyennes proches de 320 K, celle en aluminium est proche de 323 K, alors que celle du cuivre est la plus haute pour ces conditions d'écoulement et elle est égale à 324 K.

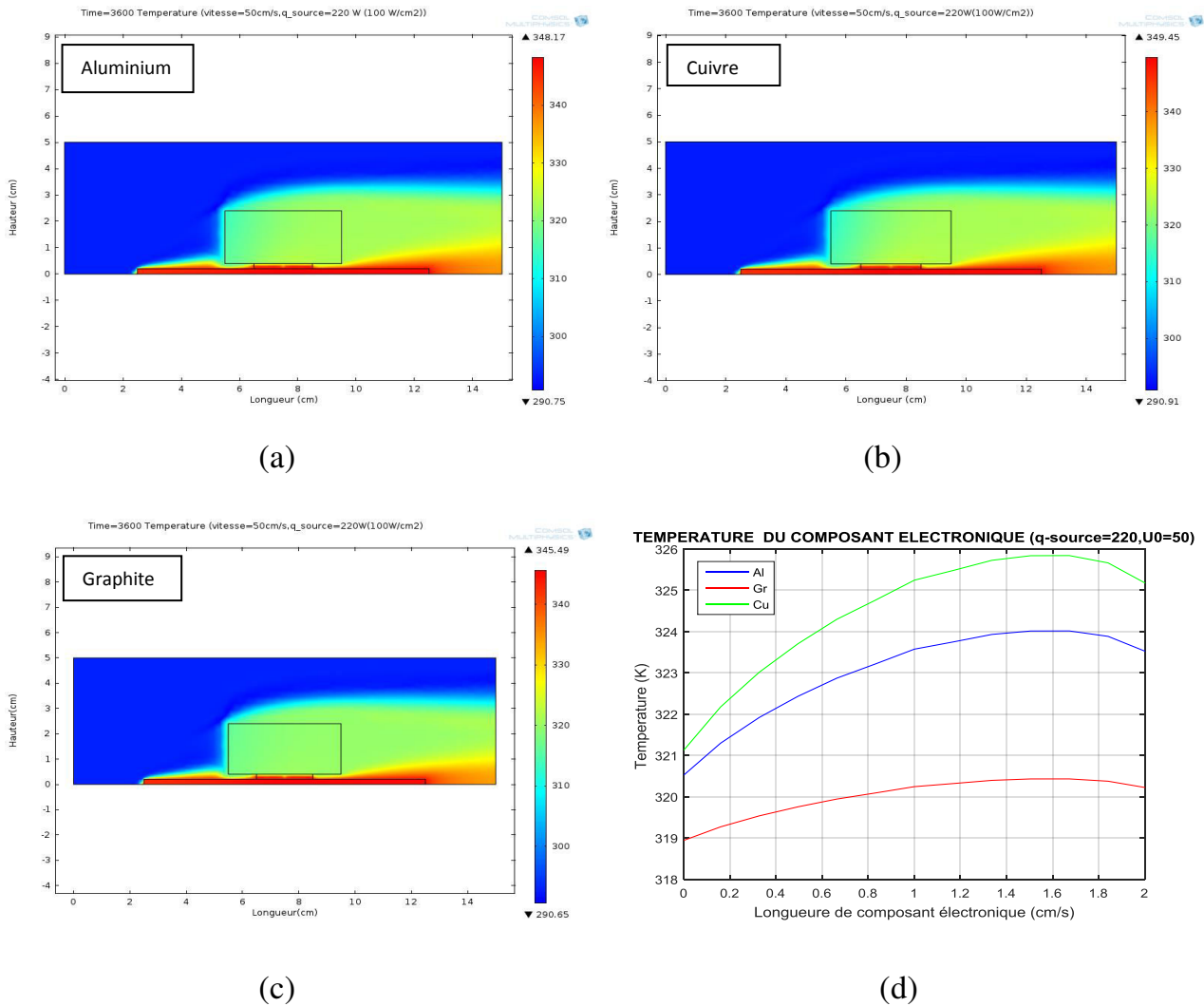


Figure III.32 : distribution de la température en 2D pour (a) l'aluminium, (b) le cuivre et (c) le graphite, (d) comparaison des profils des températures pour les trois métaux au niveau de l'interface composant-mousse métallique.

**III.5.30 Vitesses pour :  $q_{source}=220$  W,  $u_0=50$  cm/s et  $t= 3600$  s**

L'augmentation de la vitesse de l'air à l'entrée du canal à  $u_0= 50$  cm/s, et pour la même valeur du flux thermique (figure III.33, a, b et c) présente les caractéristiques suivantes : en amont du canal la vitesse de l'air est moyenne (elle est proche de 0.5 m/s pour les trois métaux l'aluminium et le cuivre , et le graphite) ainsi que le haut du canal loin du composant, tandis que l'aval du canal en haut, la vitesse de l'air est proche de 1.2 m/s pour

les trois métaux . La vitesse au niveau de la mousse métallique est proche de 0.2 m/s pour les trois métaux.

La comparaison des profils des vitesses (figure III.33.d) montre la distribution de la vitesse de l'air au plan médian du canal incluant la région libre du canal occupé par l'air et la mousse. La vitesse de l'air au sein de la mousse du graphite est plus grande en comparaison avec celles du cuivre et de l'aluminium, cette vitesse moyenne est proche de 17cm/s, alors que pour l'aluminium et le cuivre elle est proche de 16 cm/s pour les mêmes conditions d'écoulement.

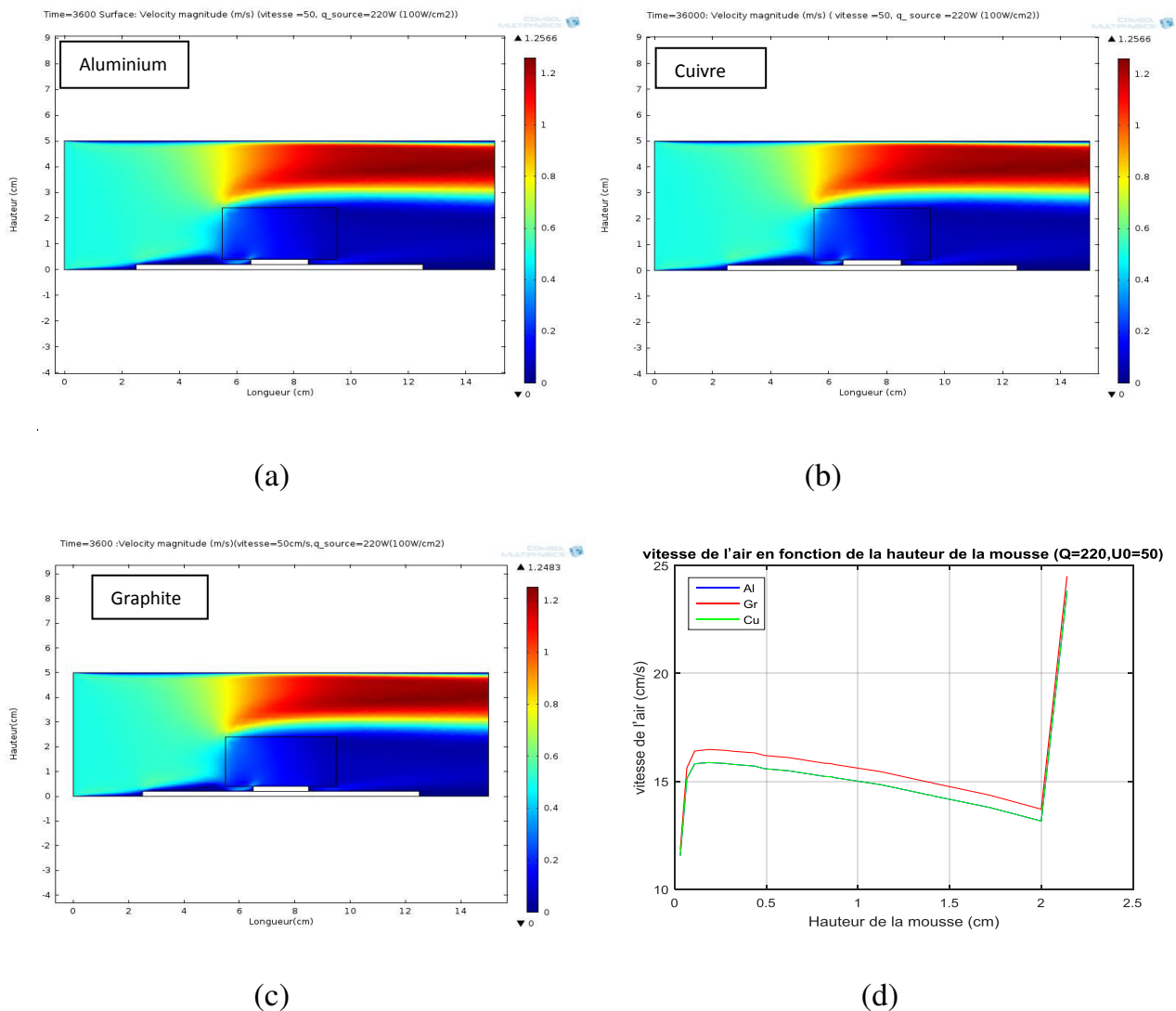
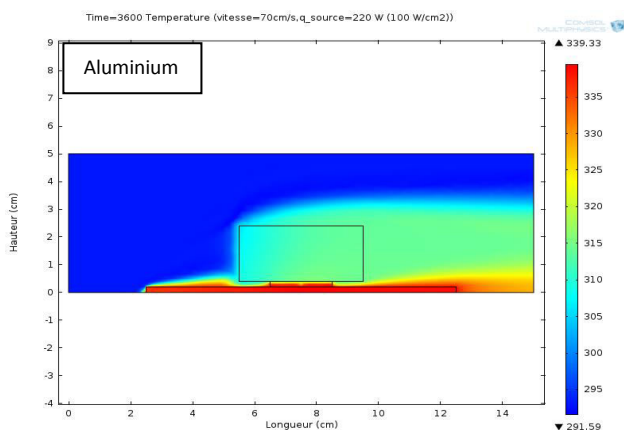


Figure III.33: distribution de la vitesse en 2D pour (a) l'aluminium, (b) le cuivre et (c) le graphite, (d) comparaison des profils des vitesses pour les trois métaux au niveau de composant-mousse métallique.

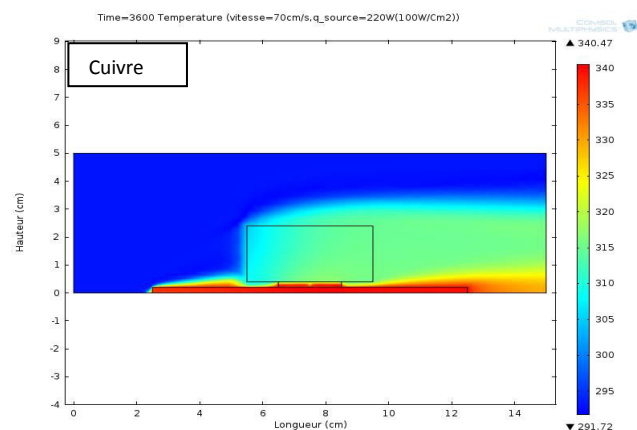
### III.5.31 Températures pour : $q_{\text{source}}=220 \text{ W}$ , $u_0=70 \text{ cm/s}$ et $t=3600 \text{ s}$

L'effet de l'augmentation de la vitesse de l'air à l'entrée du canal à  $u_0=70 \text{ cm/s}$  pour la même valeur du flux thermique présenté à la figure (III.34.a, b et c), montre un effet de chute de la température au sein du canal en comparaison avec celles pour  $u_0=50 \text{ cm/s}$  et de  $u_0=30 \text{ cm/s}$ ; l'amant du canal montre la température la plus basse (elle est proche de  $300 \text{ K}$  pour les trois métaux ( l'aluminium et le cuivre , et le graphite ) ainsi que le haut du canal loin du composant, tandis que l'aval du canal et au niveau de la plaque la température est proche de  $335 \text{ K}$  pour l'aluminium et le cuivre. La température au niveau de la mousse métallique est proche de  $310 \text{ K}$  pour les trois métaux.

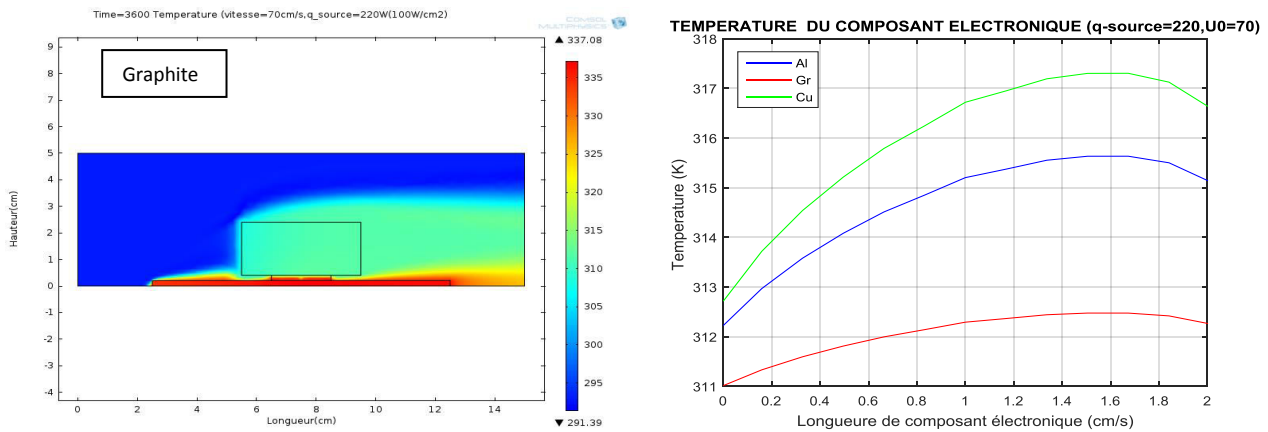
La comparaison des profils des températures (figure III.34.d) montre la distribution de la température à l'interface du composant-mousse métallique. La mousse en graphite permette de refroidir de mieux le composant à des températures moyennes proches de  $312 \text{ K}$ , celle en aluminium est proche de  $314 \text{ K}$ , alors que celle du cuivre est la plus haute pour ces conditions d'écoulement et elle est égale à  $316 \text{ K}$ .



(a)



(b)



(c)

(d)

Figure III.34 : distribution de la température en 2D pour (a) l'aluminium, (b) le cuivre et (c) le graphite, (d) comparaison des profils des températures pour les trois métaux au niveau de l'interface composant-mousse métallique.

### III.5.32 Vitesses pour : $q_{\text{source}}=220 \text{ W}$ , $u_0=70 \text{ cm/s}$ et $t=3600 \text{ s}$

L'augmentation de la vitesse de l'air à l'entrée du canal à  $u_0=70 \text{ cm/s}$ , et pour la même valeur du flux thermique (figure III.35, a, b et c) présente les caractéristiques suivantes : en l'amont du canal la vitesse de l'air est moyenne (elle est proche de  $0.7 \text{ m/s}$  pour les trois métaux l'aluminium et le cuivre, et le graphite) ainsi que le haut du canal loin du composant, tandis que l'aval du canal en haut, la vitesse de l'air est proche de  $1.6 \text{ m/s}$  pour les trois métaux. La vitesse au niveau de la mousse métallique est proche de  $0.5 \text{ m/s}$  pour les trois métaux.

La comparaison des profils des vitesses (figure III.35.d) montre la distribution de la vitesse de l'air au plan médian du canal incluant la région libre du canal occupé par l'air et la mousse. La vitesse de l'air au sein de la mousse du graphite est plus grande en comparaison avec celles du cuivre et de l'aluminium, cette vitesse moyenne est proche de  $24.4 \text{ cm/s}$ , alors que pour l'aluminium et le cuivre elle est proche de  $24 \text{ cm/s}$  pour les mêmes conditions d'écoulement.

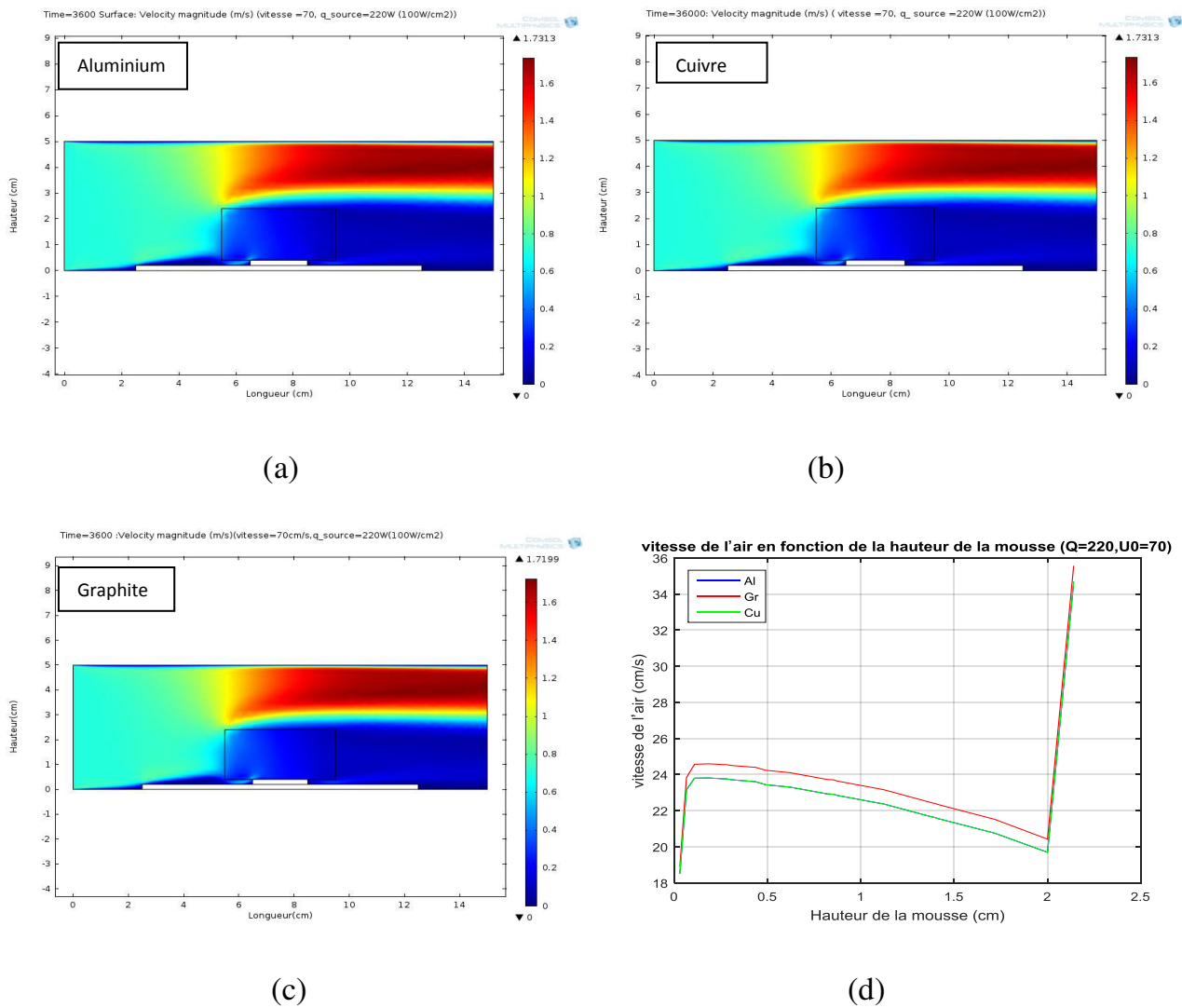


Figure III.35 : distribution de la vitesse en 2D pour (a) l'aluminium, (b) le cuivre et (c) le graphite, (d) comparaison des profils des vitesses pour les trois métaux au niveau de composant-mousse métallique.

### III.6 Conclusion

La simulation CFD par le logiciel COMSOL de l'écoulement de l'air en 2D transitoire à travers un canal muni d'un système électronique composé d'une plaque et d'un composant électronique de puissance, nous a permis de marquer les constatations suivantes :

1. Pour un flux thermique dissipé par le composant et une vitesse de l'air à l'entrée du canal imposés, les parties les plus chaudes sont le composant et la plaque, la mousse est à une température moyenne ; elle absorbe la puissance dégagée par le composant pour la faire restituer à l'air en écoulement.
2. En gardant un flux constant, l'effet de l'augmentation de la vitesse de l'air à l'entrée du canal va diminuer les températures des différentes régions au sein du canal. Sous

les mêmes conditions d'écoulement, la mousse en graphite est celle qui donne les plus basses températures du composant électronique, suivi par la mousse en Aluminium et enfin par la mousse en Cuivre.

3. La vitesse de l'air en amont du canal est similaire à celle d'entrée, elle est retardée au niveau de la mousse et elle est accélérée dans la zone supérieure à la mousse. En aval du canal elle reprend un ordre de grandeur proche de la vitesse d'entrée.
4. A l'interface du composant électronique – mousse métallique, pour les trois types de matériaux (graphite, aluminium et cuivre) l'évolution de la température est croissante, avec une faible pente pour le graphite, moyenne pente pour l'aluminium et forte pente pour le cuivre.
5. La mousse en graphite est prometteuse comme dissipateur pour les composants électroniques de puissance. Elle montre une capacité de refroidissement remarquable, suivi par celle en Aluminium et enfin par celle en Cuivre.
6. En perspective, il reste à vérifier la chute de pression au sein des trois mousses pour compléter notre étude thermo hydraulique.

# Chapitre IV

## RESULTATS DE LA SIMULATION CFD EN 3D TRANSITOIRE PAR LE LOGICIEL COMSOL 4.3.

IV.1	Introduction
IV.2.	Géométrie du système simulé
IV.3.	Maillage du système simulé
IV.4.	Résultats de la simulation thermohydraulique
IV.5.	Conclusion

---

### Résumé :

**L'**Objectif de ce chapitre c'est de présenter et d'analyser les résultats de simulation en 3D transitoire par le logiciel COMSOL d'un dissipateur en mousse métallique d'un système électronique de puissance.

---

### IV.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous exposons les résultats de simulation en 3D transitoire de l'écoulement de l'air au sein du canal comportant une plaque électronique muni d'un dissipateur en mousse métallique. Nous sommes intéressés par la simulation des conditions réelles de l'écoulement de l'air au sein du canal et à travers la plaque électronique et le dissipateur en mousse métallique (figure IV.1). Le but est de :

- pouvoir déterminer sous les conditions d'un flux thermique dissipé par le composant électronique imposé, et une vitesse de l'air imposée à l'entrée du canal, la distribution spatiotemporelle de la température et de la vitesse au sein du système.
- discuté les effets de l'augmentation du flux thermique du composant, et l'augmentation de la vitesse de l'air à l'entrée, et du type de métal utilisé pour la mousse sur la phénoménologie du système.

## IV.2 Géométrie du système simulé

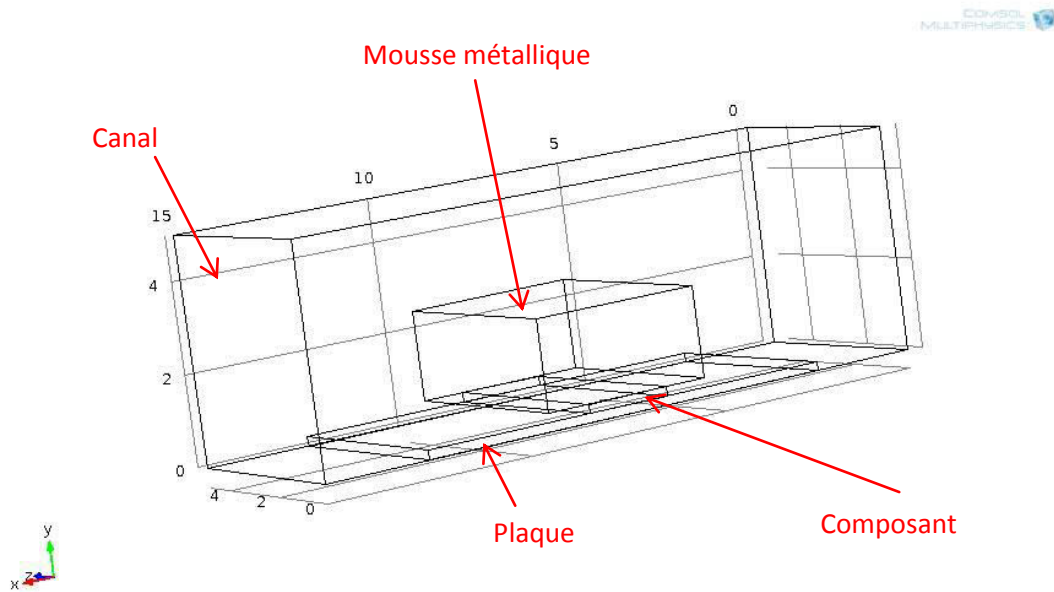


Figure IV.1 : Géométrie 3D du système de refroidissement étudié.

## IV.3 Maillage du système simulé

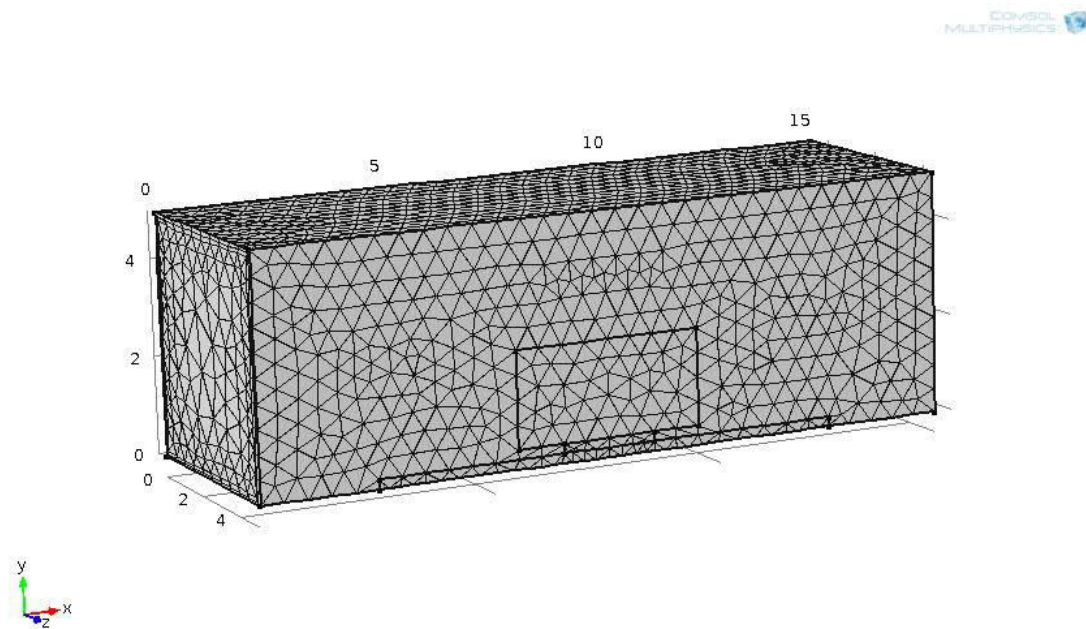


Figure IV.2 : Maillage 3D du système de refroidissement étudié.

## IV.4 Résultats de la simulation au sein du canal

### IV.4.1 Températures pour : $q_{\text{source}}=1.25\text{MW/m}^3$ et $u_0=30\text{ cm/s}$ et $t=3600\text{s}$

La simulation en 3D transitoire de l'écoulement de l'air à travers le canal comportant le système plaque-composant électronique avec le dissipateur en mousse, sous les conditions d'un flux thermique du composant  $1.25\text{ MW/m}^3$  et une vitesse d'entrée  $u_0=30\text{ cm/s}$  en un interval de temps  $t=3600\text{s}$  est présentée.

Les figures (IV.3.a, b et c) représentent la distribution de la température en 3D transitoire au sein du canal sous les conditions mentionnées ci-dessus. La quatrième figure (IV.3.d) représente la comparaison des profils de température à l'interface composant-mousse métallique sous les mêmes conditions d'écoulement.

L'aval du canal et le dessus du dissipateur se trouve presque à la température ambiante, l'intégralité du flux dissipé par le composant électronique est transféré à la plaque d'une part, et absorbé par le dissipateur en mousse de l'autre part, cette partie de flux est dissipée par transfert de chaleur mixte conduction-convection envers l'air (fluide caloporteur). La phénoménologie du transport de la chaleur au sein du canal est identique pour les trois métaux (Aluminium, cuivre et graphite), la différence réside dans les valeurs des températures. On peut distinguer trois zones : zone composant-plaque, zone du dissipateur et zone amont-dessus du canal, chacune des zones se trouve à une température distincte. Pour l'aluminium, la distribution de la température dans les trois zones est respectivement : 310K, 302.5 et 292.5 K. pour le cuivre : 311K, 302.5 et 292.5 K , et pour le graphite : 309K, 302.5 et 295 K.

La comparaison des profils des températures à l'interface composant-mousse (figure IV.3.d) montre que la mousse en graphite est meilleure en refroidissement suivie par celle en aluminium, et enfin par celle en cuivre. Ce résultat est identique à celui de la simulation en 2D transitoire, ce qui donne plus de validité aux résultats de simulations en 3D.

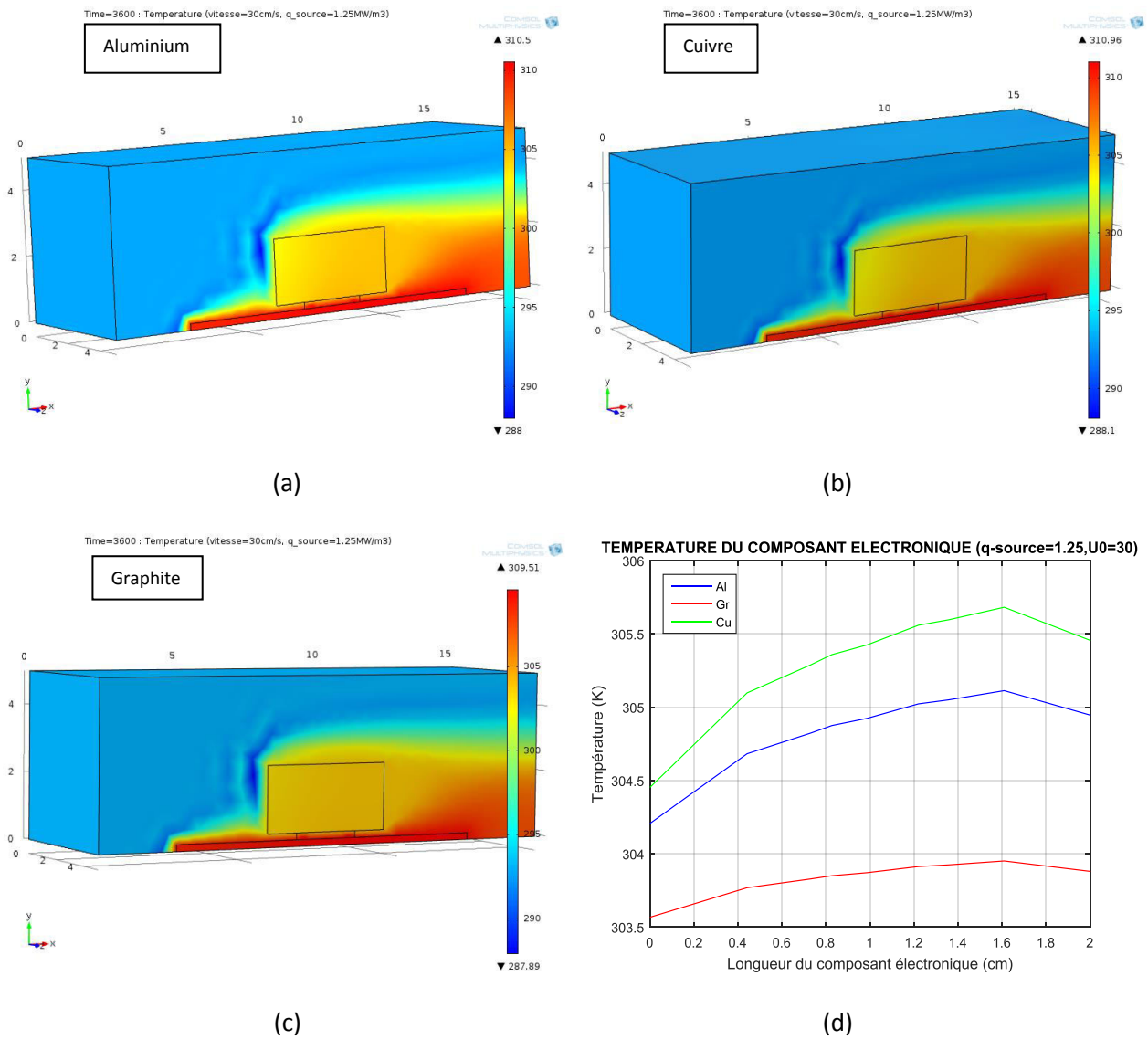


Figure IV. 3 : distribution de la température en 3D pour (a) l'aluminium, (b) le cuivre et (c) le graphite, (d) comparaison des profils des températures pour les trois métaux au niveau de l'interface composant-mousse métallique.

#### IV.4.2 Vitesses pour : $q_{source}=1.25MW/m^3$ et $u_0=30$ cm/s et $t=3600s$

Aux figures (IV.4.a, b et c), la vitesse de l'air est moyenne en amont du canal (30 cm/s), faible au niveau de la mousse (10 cm/s), et forte en dessus de la mousse (75 cm/s). Ce comportement est presque identique pour les trois métaux (Aluminium, cuivre et graphite). Au niveau du plan médian de la mousse (figure IV.4.d), la comparaison des profils des vitesses, montre des profils presque identiques. Au sein de la mousse en graphite, la vitesse est légèrement plus grande que celles en aluminium et en cuivre.

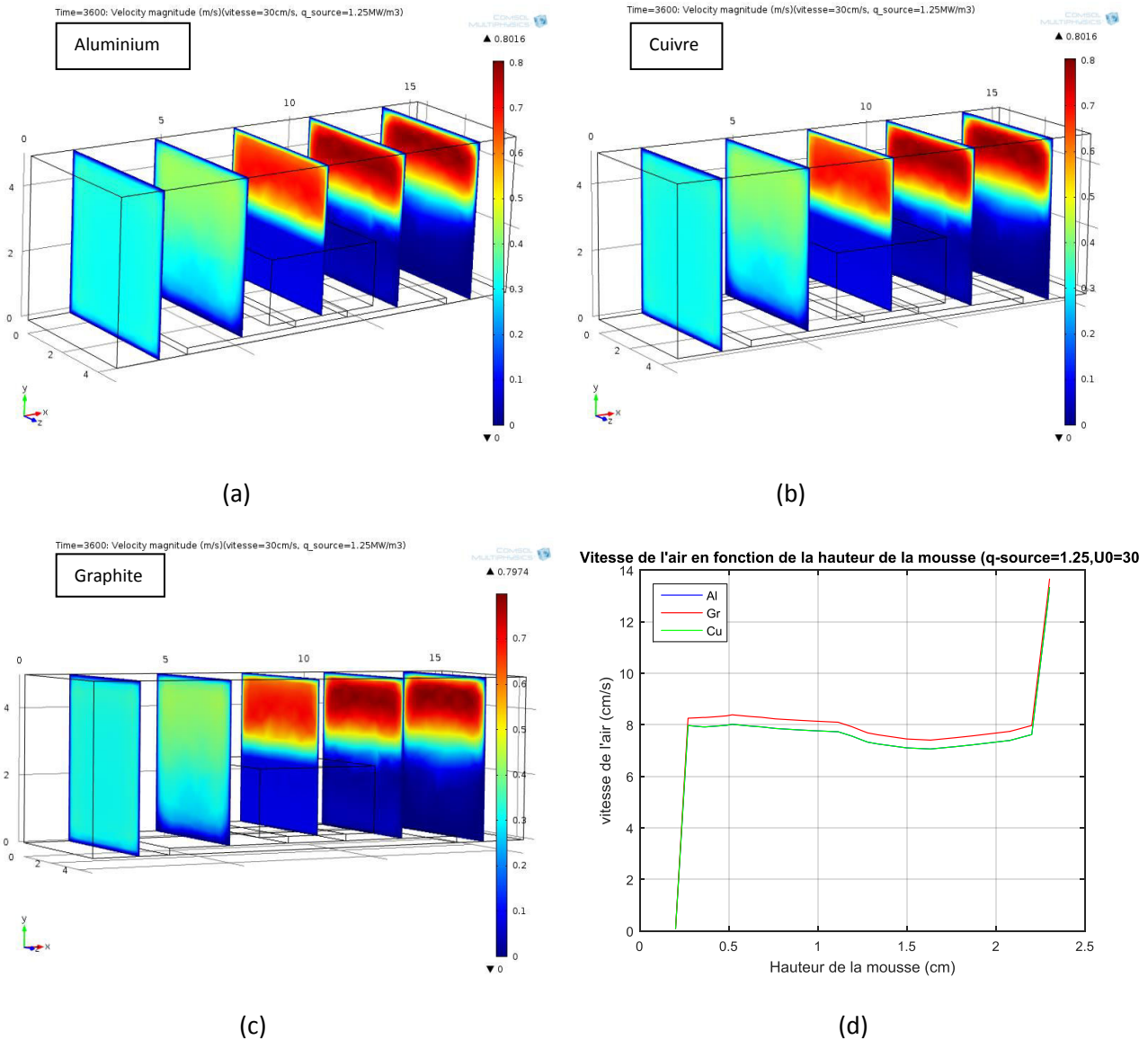


Figure IV.4: distribution de la vitesse en 3D pour (a) l’aluminium, (b) le cuivre et (c) le graphite, (d) comparaison des profils des vitesses pour les trois métaux au niveau de l’interface de composant-mousse métallique.

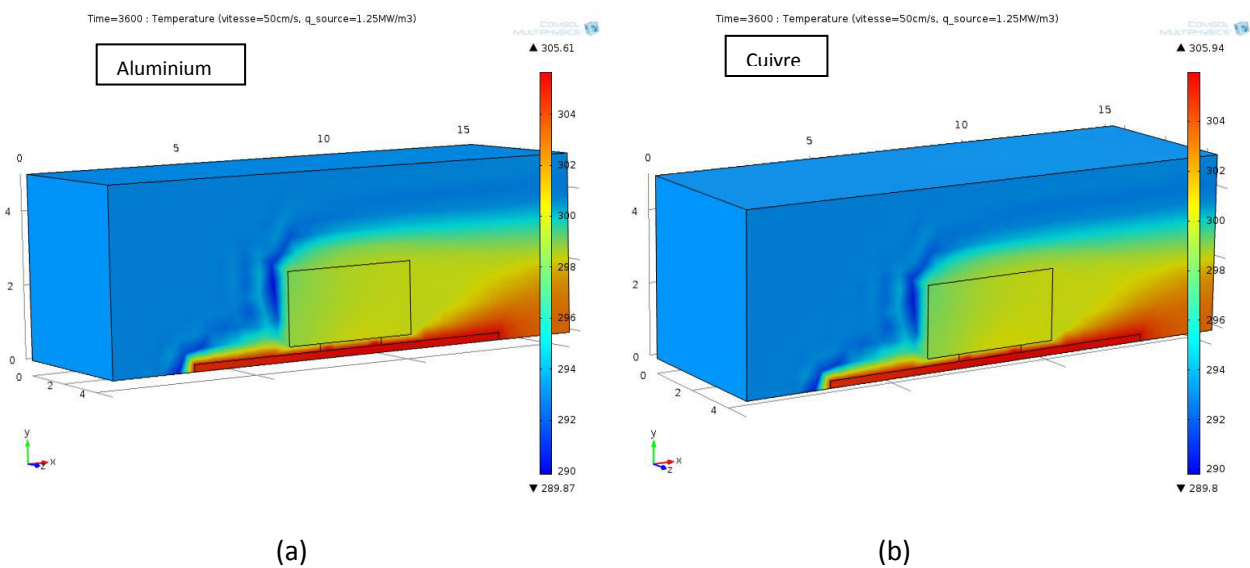
#### IV.4.3 Températures pour : $q_{source}=1.25MW/m^3$ et $u_0=50\text{ cm/s}$ et $t=3600s$

La simulation en 3D transitoire de l’écoulement de l’air à travers le canal comportant le système plaque-composant électronique avec le dissipateur en mousse, sous les conditions d’un flux thermique du composant  $1.25\text{ MW/m}^3$  et une vitesse d’entrée  $u_0=50\text{ cm/s}$  en un interval de temps  $t=3600s$  est présentée.

Les figures (IV.5.a, b et c) représentent la distribution de la température en 3D transitoire au sein du canal sous les conditions mentionnées ci-dessus. La quatrième figure (IV.5.d) représente la comparaison des profils de température à l’interface composant-mousse métallique sous les mêmes conditions d’écoulement.

L'aval du canal et le dessus du dissipateur se trouve presque à la température ambiante, l'intégralité du flux dissipé par le composant électronique est transféré à la plaque d'une part, et absorbé par le dissipateur en mousse de l'autre part, cette partie de flux est dissipée par transfert de chaleur mixte conduction-convection envers l'air (fluide caloporteur). La phénoménologie du transport de la chaleur au sein du canal est identique pour les trois métaux (Aluminium, cuivre et graphite), la différence réside dans les valeurs des températures. On peut distinguer trois zones : zone composant-plaque, zone du dissipateur et zone amont-dessus du canal, chacune des zones se trouve à une température distinguée. Pour l'aluminium, la distribution de la température dans les trois zones est respectivement : 304K, 299 et 294 K. pour le cuivre : 305K, 300 et 292.5 K , et pour le graphite : 305K, 298.5 et 293 K.

La comparaison des profils des températures à l'interface composant-mousse (figure IV.5.d) montre que la mousse en graphite est meilleure en refroidissement suivie par celle en aluminium, et enfin par celle en cuivre. Ce résultat est identique à celui de la simulation en 2D transitoire, ce qui donne plus de validité au résultats de simulations en 3D.



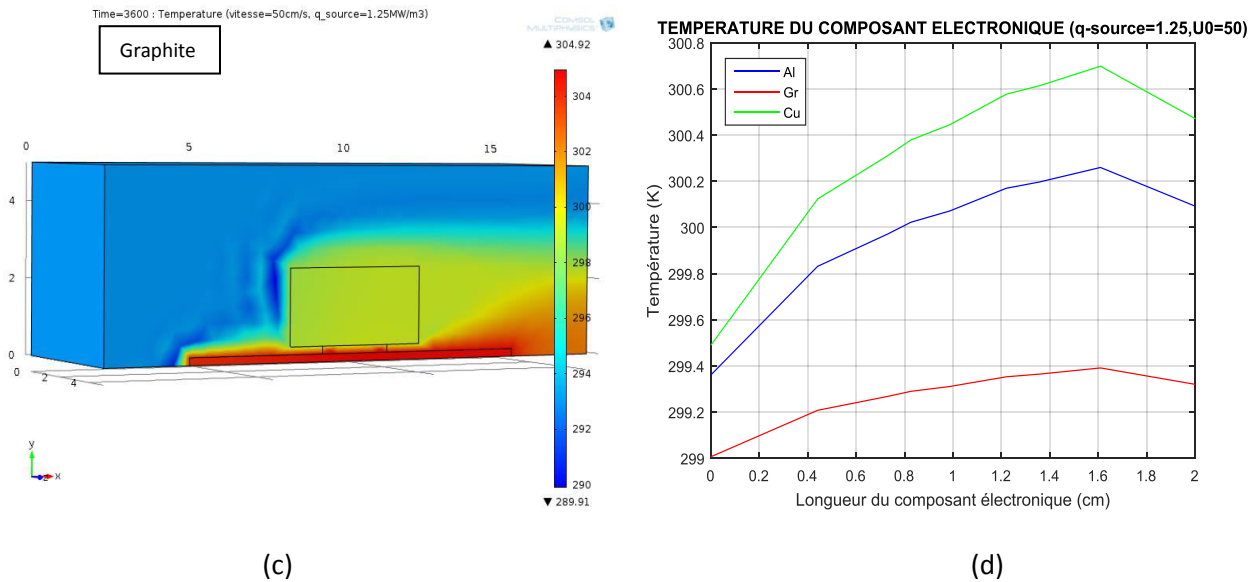
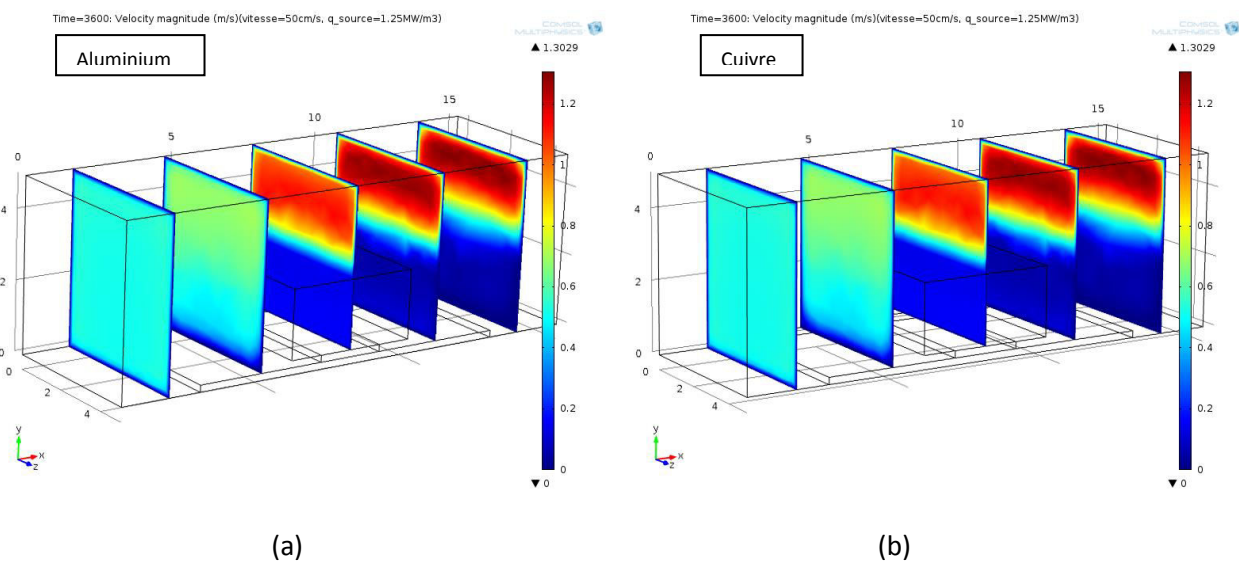


Figure IV.5 : distribution de la température en 3D pour (a) l’aluminium, (b) le cuivre et (c) le graphite, (d) comparaison des profils des températures pour les trois métaux au niveau de l’interface composant-mousse métallique.

#### IV.4.4 Vitesses pour : $q_{source}=1.25MW/m^3$ et $u_0=50\text{ cm/s}$ et $t=3600s$

Aux figures (IV.6.a, b et c), la vitesse de l’air est moyenne en amont du canal (30 cm/s), faible au niveau de la mousse (10 cm/s), et forte en dessus de la mousse (120 cm/s). Ce comportement est presque identique pour les trois métaux (Aluminium, cuivre et graphite). Au niveau du plan médian de la mousse (figure IV.6.d), la comparaison des profils des vitesses, montre des profils presque identiques. Au sein de la mousse en graphite, la vitesse est légèrement plus grande que celles en aluminium et en cuivre.



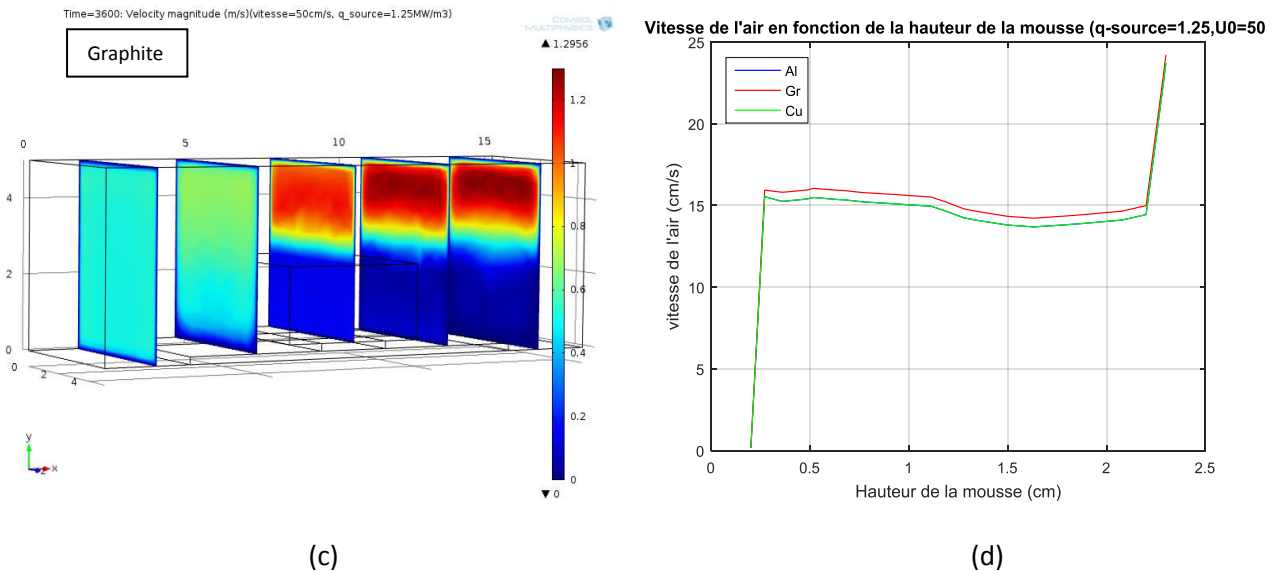


Figure IV.6: distribution de la vitesse en 3D pour (a) l'aluminium, (b) le cuivre et (c) le graphite, (d) comparaison des profils des vitesses pour les trois métaux au niveau de centre de composant-mousse métallique.

#### IV.4.5 Températures pour : $q_{\text{source}}=1.25\text{MW/m}^3$ et $u_0=70\text{ cm/s}$ et $t=3600\text{s}$

La simulation en 3D transitoire de l'écoulement de l'air à travers le canal comportant le système plaque-composant électronique avec le dissipateur en mousse, sous les conditions d'un flux thermique du composant  $1.25\text{ MW/m}^3$  et une vitesse d'entrée  $u_0=70\text{ cm/s}$  en un interval de temps  $t=3600\text{s}$  est présentée.

Les figures (IV.7.a, b et c) représentent la distribution de la température en 3D transitoire au sein du canal sous les conditions mentionnées ci-dessus. La quatrième figure (IV.7.d) représente la comparaison des profils de température à l'interface composant-mousse métallique sous les mêmes conditions d'écoulement.

L'aval du canal et le dessus du dissipateur se trouve presque à la température ambiante, l'intégralité du flux dissipé par le composant électronique est transféré à la plaque d'une part, et absorbé par le dissipateur en mousse de l'autre part, cette partie de flux est dissipée par transfert de chaleur mixte conduction-convection envers l'air (fluide caloporteur). La phénoménologie du transport de la chaleur au sein du canal est identique pour les trois métaux (Aluminium, cuivre et graphite), la différence réside dans les valeurs des températures. On peut distinguer trois zones : zone composant-plaque, zone du dissipateur et zone amont-dessus du canal, chacune des zones se trouve à une température distincte.

Pour l'aluminium, la distribution de la température dans les trois zones est respectivement : 302K, 298 et 294 K. pour le cuivre : 303K, 298 et 293 K , et pour le graphite : 302K, 297 et 293 K.

La comparaison des profils des températures à l'interface composant-mousse (figure IV.7.d) montre que la mousse en graphite est meilleure en refroidissement suivie par celle en aluminium, et enfin par celle en cuivre. Ce résultat est identique à celui de la simulation en 2D transitoire, ce qui donne plus de validité au résultats de simulations en 3D.

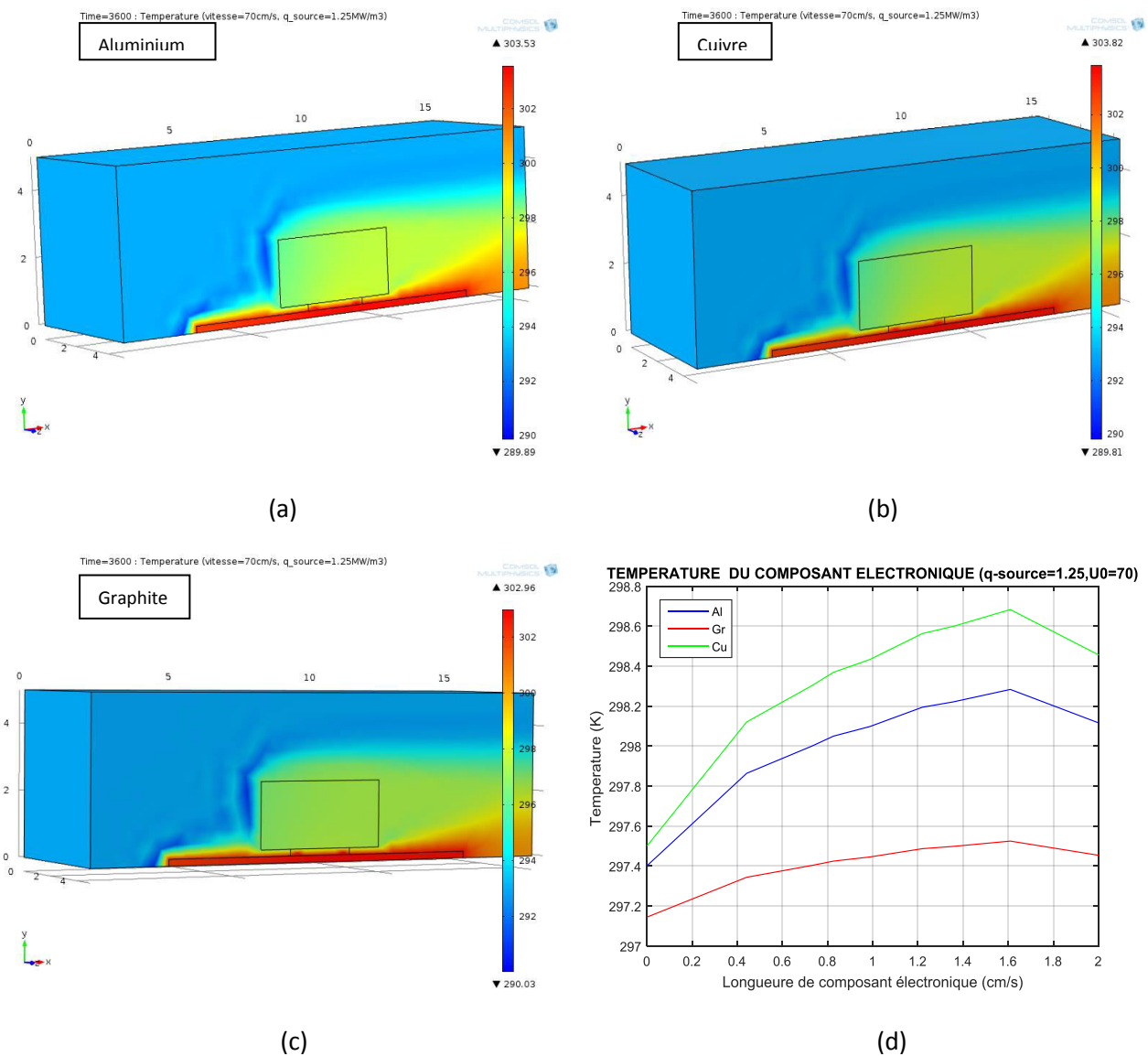


Figure IV.7: distribution de la température en 3D pour (a) l'aluminium, (b) le cuivre et (c) le graphite, (d) comparaison des profils des températures pour les trois métaux au niveau de l'interface composant-mousse métallique.

#### IV.4.6 Vitesses pour : $q_{\text{source}}=1.25\text{MW/m}^3$ et $u_0=70\text{ cm/s}$ et $t=3600\text{s}$

Aux figures (IV.8.a, b et c), la vitesse de l'air est moyenne en amont du canal (60 cm/s), faible au niveau de la mousse (20 cm/s), et forte en dessus de la mousse (165 cm/s). Ce comportement est presque identique pour les trois métaux (Aluminium, cuivre et graphite). Au niveau du plan médian de la mousse (figure IV.8.d), la comparaison des profils des vitesses, montre des profils presque identiques. Au sein de la mousse en graphite, la vitesse est légèrement plus grande que celles en aluminium et en cuivre.

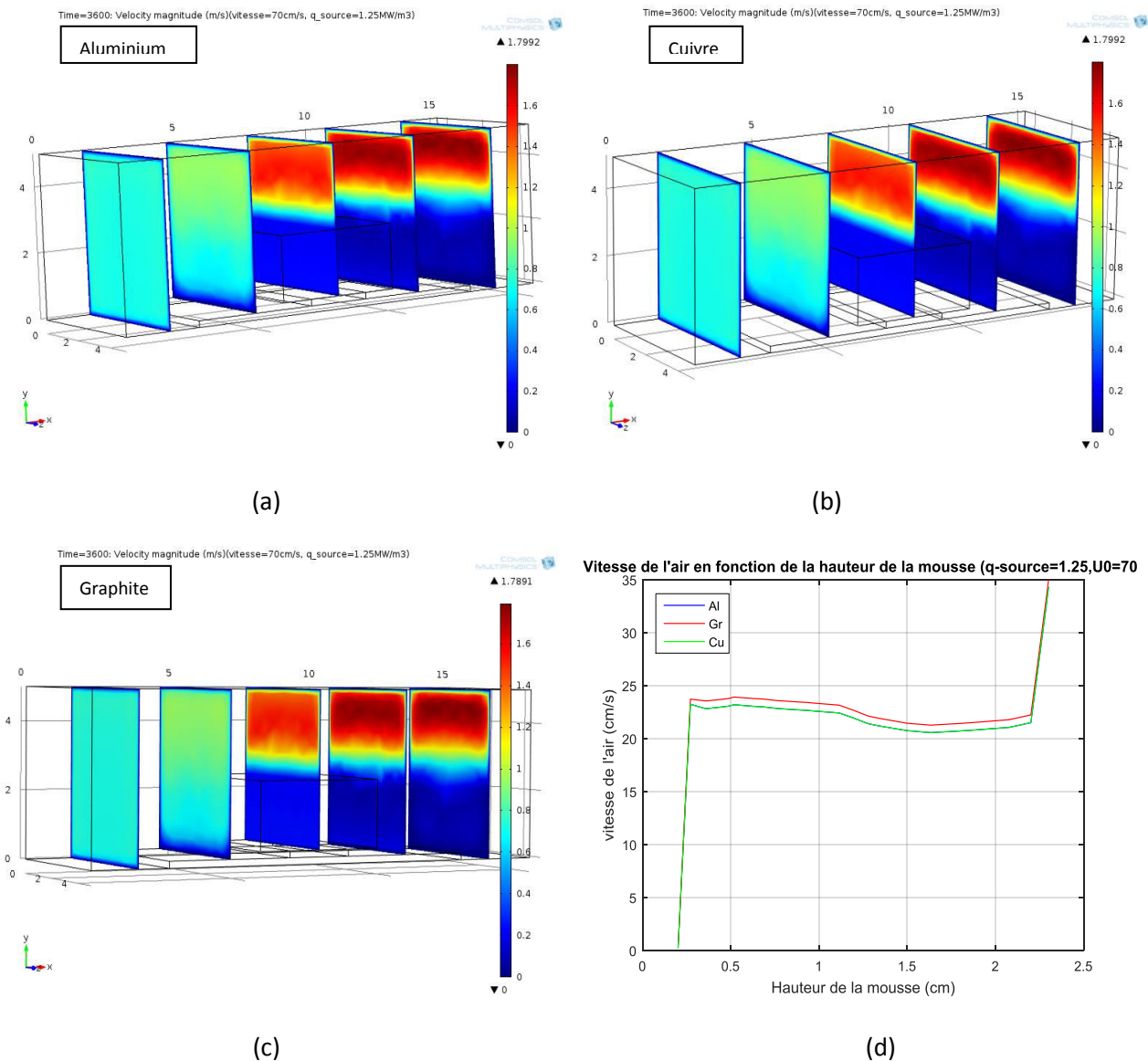


Figure IV.8 : distribution de la vitesse en 3D pour (a) l'aluminium, (b) le cuivre et (c) le graphite, (d) comparaison des profils des vitesses pour les trois métaux au niveau de centre de composant-mousse métallique.

#### IV.4.7 Températures pour : $q_{\text{source}}=1.5\text{MW/m}^3$ et $u_0=30\text{ cm/s}$ et $t=3600\text{s}$

La simulation en 3D transitoire de l'écoulement de l'air à travers le canal comportant le système plaque-composant électronique avec le dissipateur en mousse, sous les conditions d'un flux thermique du composant  $1.5\text{ MW/m}^3$  et une vitesse d'entrée  $u_0=30\text{ cm/s}$  en un interval de temps  $t=3600\text{s}$  est présentée.

Les figures (IV.9.a, b et c) représentent la distribution de la température en 3D transitoire au sein du canal sous les conditions mentionnées ci-dessus. La quatrième figure (IV.9.d) représente la comparaison des profils de température à l'interface composant-mousse métallique sous les mêmes conditions d'écoulement.

L'aval du canal et le dessus du dissipateur se trouve presque à la température ambiante, l'intégralité du flux dissipé par le composant électronique est transféré à la plaque d'une part, et absorbé par le dissipateur en mousse de l'autre part, cette partie de flux est dissipée par transfert de chaleur mixte conduction-convection envers l'air (fluide caloporteur). La phénoménologie du transport de la chaleur au sein du canal est identique pour les trois métaux (Aluminium, cuivre et graphite), la différence réside dans les valeurs des températures. On peut distinguer trois zones : zone composant-plaque, zone du dissipateur et zone amont-dessus du canal, chacune des zones se trouve à une température distincte. Pour l'aluminium, la distribution de la température dans les trois zones est respectivement : 312K, 305 et 295 K. pour le cuivre : 313K, 305.5 et 294 K , et pour le graphite : 311K, 305.5 et 295 K.

La comparaison des profils des températures à l'interface composant-mousse (figure IV.9.d) montre que la mousse en graphite est meilleure en refroidissement suivie par celle en aluminium, et enfin par celle en cuivre. Ce résultat est identique à celui de la simulation en 2D transitoire, ce qui donne plus de validité aux résultats de simulations en 3D.

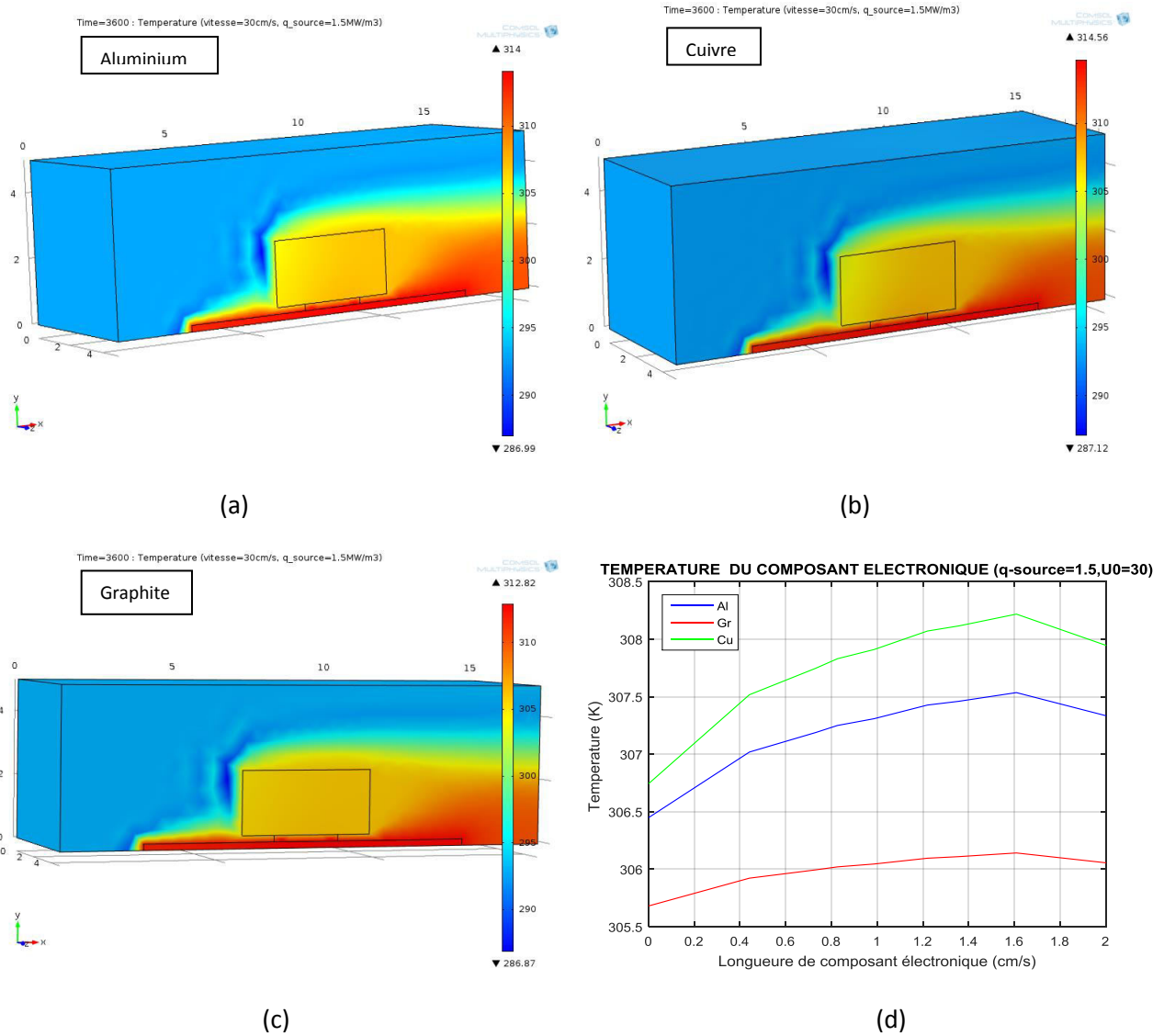


Figure IV.9 : distribution de la température en 3D pour (a) l’aluminium, (b) le cuivre et (c) le graphite, (d) comparaison des profils des vitesses pour les trois métaux au niveau de centre de composant-mousse métallique.

**IV.4.8 Vitesses pour :  $q_{source}=1.5MW/m^3$  et  $u_0=30\text{ cm/s}$  et  $t=3600s$**

Aux figures (IV.10.a, b et c), la vitesse de l’air est moyenne en amont du canal (30 cm/s), faible au niveau de la mousse (10 cm/s), et forte en dessus de la mousse (75 cm/s). Ce comportement est presque identique pour les trois métaux (Aluminium, cuivre et graphite). Au niveau du plan médian de la mousse (figure IV.10.d), la comparaison des profils des vitesses, montre des profils presque identiques. Au sein de la mousse en graphite, la vitesse est légèrement plus grande que celles en aluminium et en cuivre.

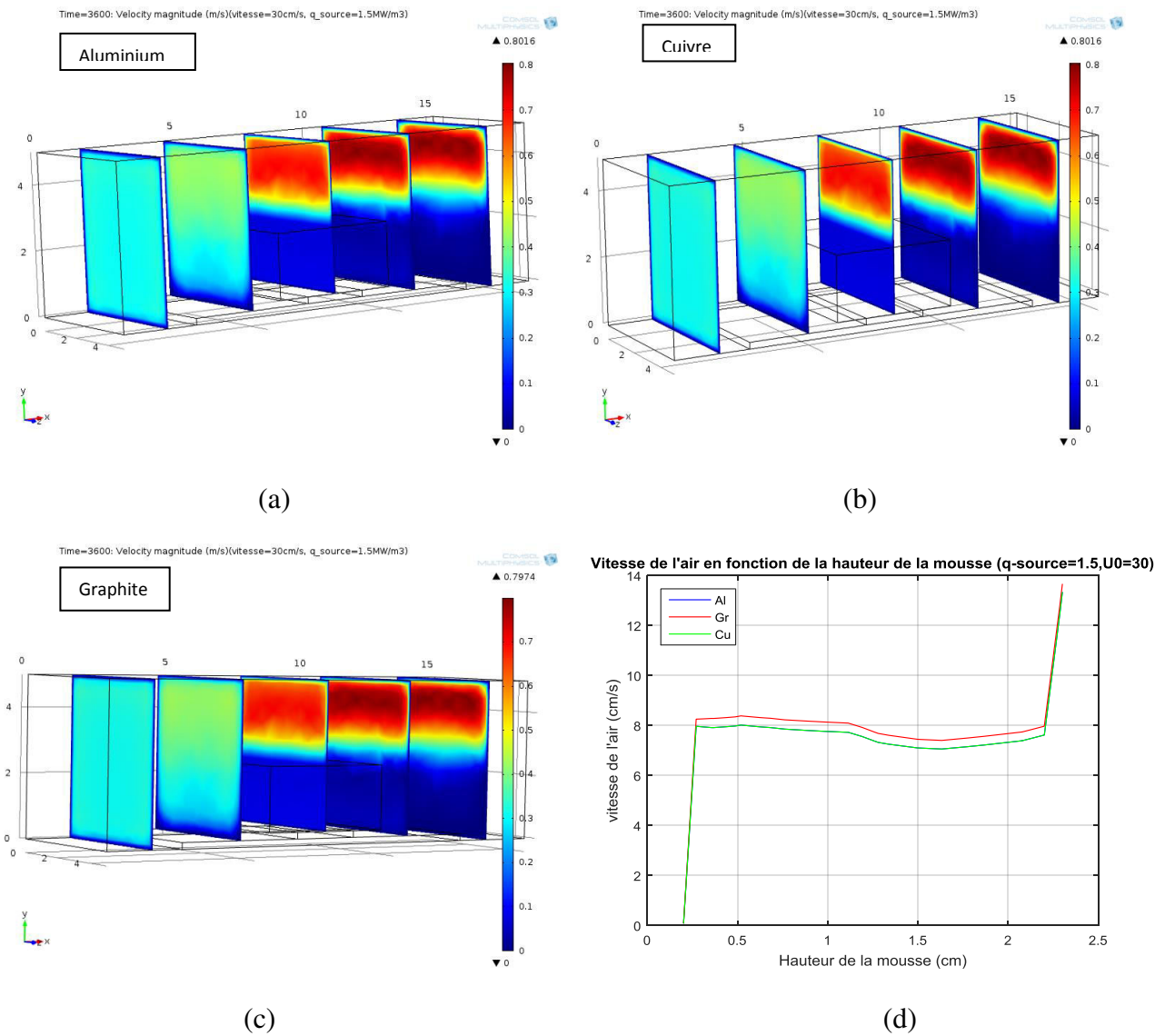


Figure IV.10 : distribution de la vitesse en 3D pour (a) l'aluminium, (b) le cuivre et (c) le graphite, (d) comparaison des profils des vitesses pour les trois métaux au niveau de centre de composant-mousse métallique.

#### IV.4.9 Températures pour : $q_{source}=1.5MW/m^3$ et $u_0=50$ cm/s et $t=3600$ s

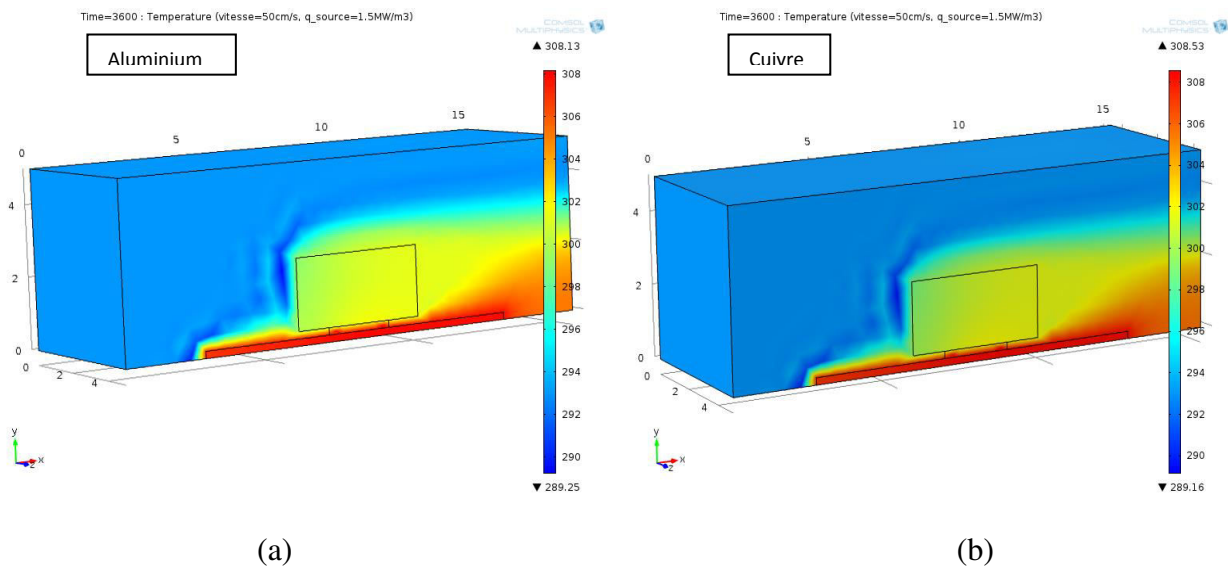
La simulation en 3D transitoire de l'écoulement de l'air à travers le canal comportant le système plaque-composant électronique avec le dissipateur en mousse, sous les conditions d'un flux thermique du composant  $1.5 MW/m^3$  et une vitesse d'entrée  $u_0=50$  cm/s en un interval de temps  $t=3600$ s est présentée.

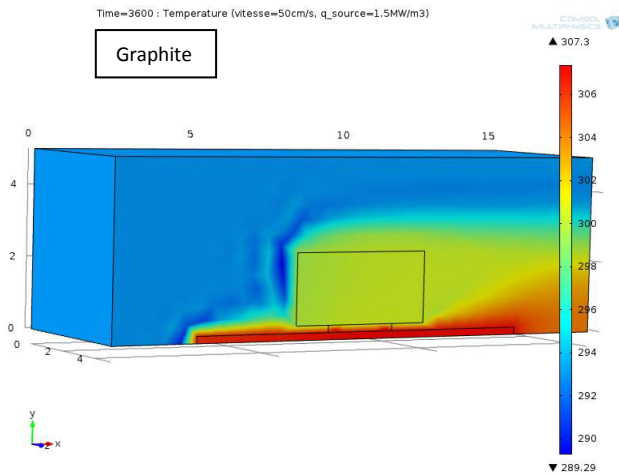
Les figures (IV.11.a, b et c) représentent la distribution de la température en 3D transitoire au sein du canal sous les conditions mentionnées ci-dessus. La quatrième figure

(IV.11.d) représente la comparaison des profils de température à l'interface composant-mousse métallique sous les mêmes conditions d'écoulement.

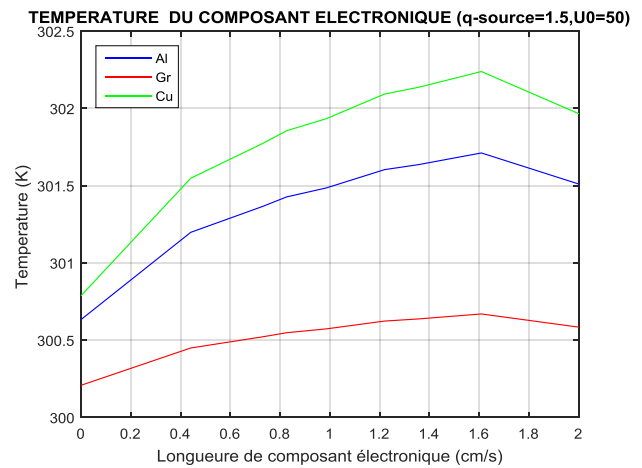
L'aval du canal et le dessus du dissipateur se trouve presque à la température ambiante, l'intégralité du flux dissipé par le composant électronique est transféré à la plaque d'une part, et absorbé par le dissipateur en mousse de l'autre part, cette partie de flux est dissipée par transfert de chaleur mixte conduction-convection envers l'air (fluide caloporteur). La phénoménologie du transport de la chaleur au sein du canal est identique pour les trois métaux (Aluminium, cuivre et graphite), la différence réside dans les valeurs des températures. On peut distinguer trois zones : zone composant-plaque, zone du dissipateur et zone amont-dessus du canal, chacune des zones se trouve à une température distincte. Pour l'aluminium, la distribution de la température dans les trois zones est respectivement : 307K, 300 et 294 K. pour le cuivre : 308K, 300 et 294 K, et pour le graphite : 306K, 300 et 292 K.

La comparaison des profils des températures à l'interface composant-mousse (figure IV.11.d) montre que la mousse en graphite est meilleure en refroidissement suivie par celle en aluminium, et enfin par celle en cuivre. Ce résultat est identique à celui de la simulation en 2D transitoire, ce qui donne plus de validité aux résultats de simulations en 3D.





(c)

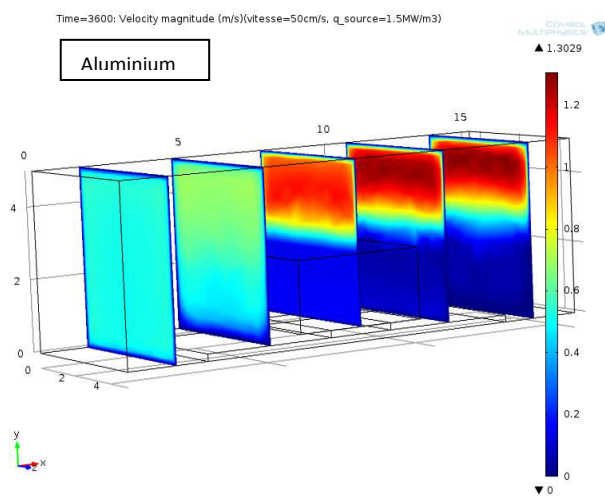


(d)

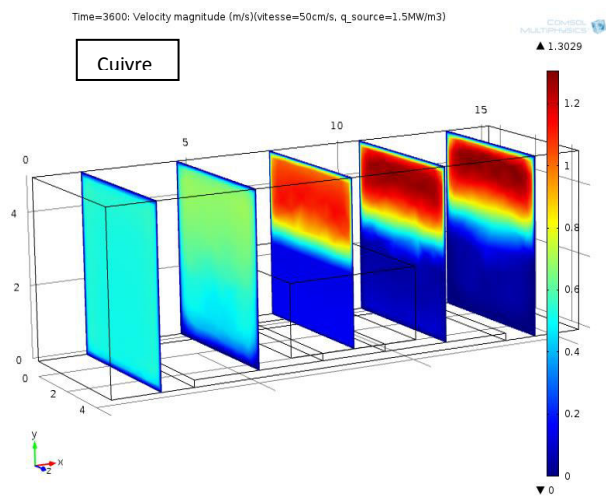
Figure IV.11 : distribution de la température en 3D pour (a) l’aluminium, (b) le cuivre et (c) le graphite, (d) comparaison des profils des vitesses pour les trois métaux au niveau de centre de composant-mousse métallique.

#### IV.4.10 Vitesses pour : $q_{source}=1.5MW/m^3$ et $u_0=50$ cm/s et $t=3600s$

Aux figures (IV.12.a, b et c), la vitesse de l’air est moyenne en amont du canal (45 cm/s), faible au niveau de la mousse (20 cm/s), et forte en dessus de la mousse (125 cm/s). Ce comportement est presque identique pour les trois métaux (Aluminium, cuivre et graphite). Au niveau du plan médian de la mousse (figure IV.12.d), la comparaison des profils des vitesses, montre des profils presque identiques. Au sein de la mousse en graphite, la vitesse est légèrement plus grande que celles en aluminium et en cuivre.



(a)



(b)

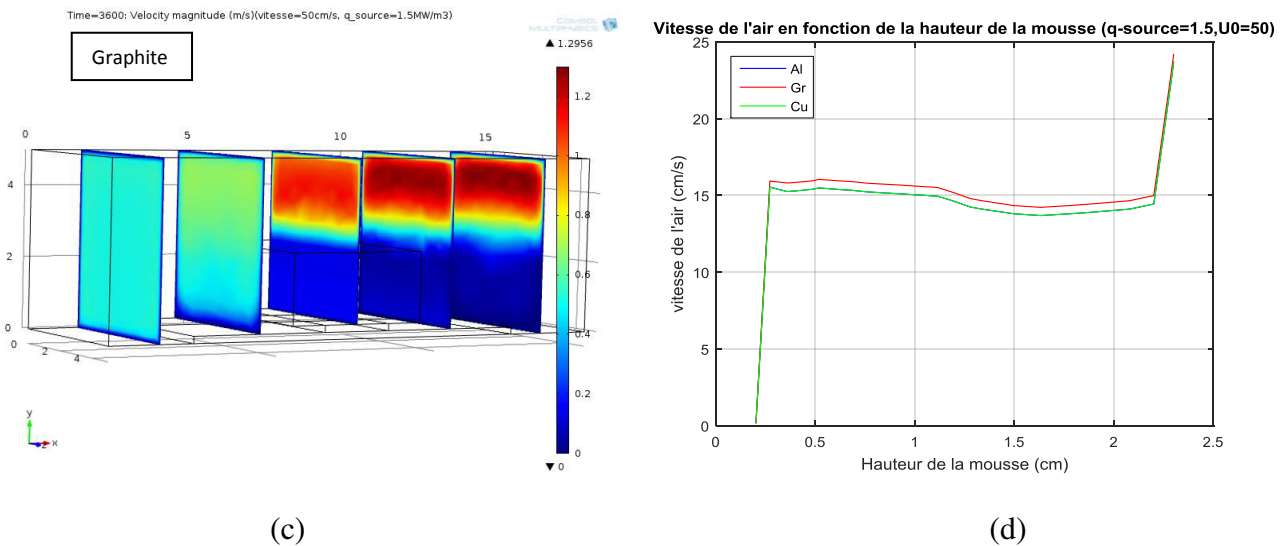


Figure IV.12 : distribution de la vitesse en 3D pour (a) l'aluminium, (b) le cuivre et (c) le graphite, (d) comparaison des profils des vitesses pour les trois métaux au niveau de centre de composant-mousse métallique.

#### IV.4.11 Températures pour : $q_{\text{source}}=1.5\text{MW/m}^3$ et $u_0=70\text{ cm/s}$ et $t=3600\text{s}$

La simulation en 3D transitoire de l'écoulement de l'air à travers le canal comportant le système plaque-composant électronique avec le dissipateur en mousse, sous les conditions d'un flux thermique du composant  $1.5\text{ MW/m}^3$  et une vitesse d'entrée  $u_0=70\text{ cm/s}$  en un interval de temps  $t=3600\text{s}$  est présentée.

Les figures (IV.13.a, b et c) représentent la distribution de la température en 3D transitoire au sein du canal sous les conditions mentionnées ci-dessus. La quatrième figure (IV.13.d) représente la comparaison des profils de température à l'interface composant-mousse métallique sous les mêmes conditions d'écoulement.

L'aval du canal et le dessus du dissipateur se trouve presque à la température ambiante, l'intégralité du flux dissipé par le composant électronique est transféré à la plaque d'une part, et absorbé par le dissipateur en mousse de l'autre part, cette partie de flux est dissipée par transfert de chaleur mixte conduction-convection envers l'air (fluide caloporteur). La phénoménologie du transport de la chaleur au sein du canal est identique pour les trois métaux (Aluminium, cuivre et graphite), la différence réside dans les valeurs des températures. On peut distinguer trois zones : zone composant-plaque, zone du dissipateur et zone amont-dessus du canal, chacune des zones se trouve à une température distinguée. Pour l'aluminium, la distribution de la température dans les trois zones est respectivement :

304K, 299 et 293 K. pour le cuivre : 304K, 299 et 293 K , et pour le graphite : 304K, 298 et 292 K.

La comparaison des profils des températures à l’interface composant-mousse (figure IV.13.d) montre que la mousse en graphite est meilleure en refroidissement suivie par celle en aluminium, et enfin par celle en cuivre. Ce résultat est identique à celui de la simulation en 2D transitoire, ce qui donne plus de validité au résultats de simulations en 3D.

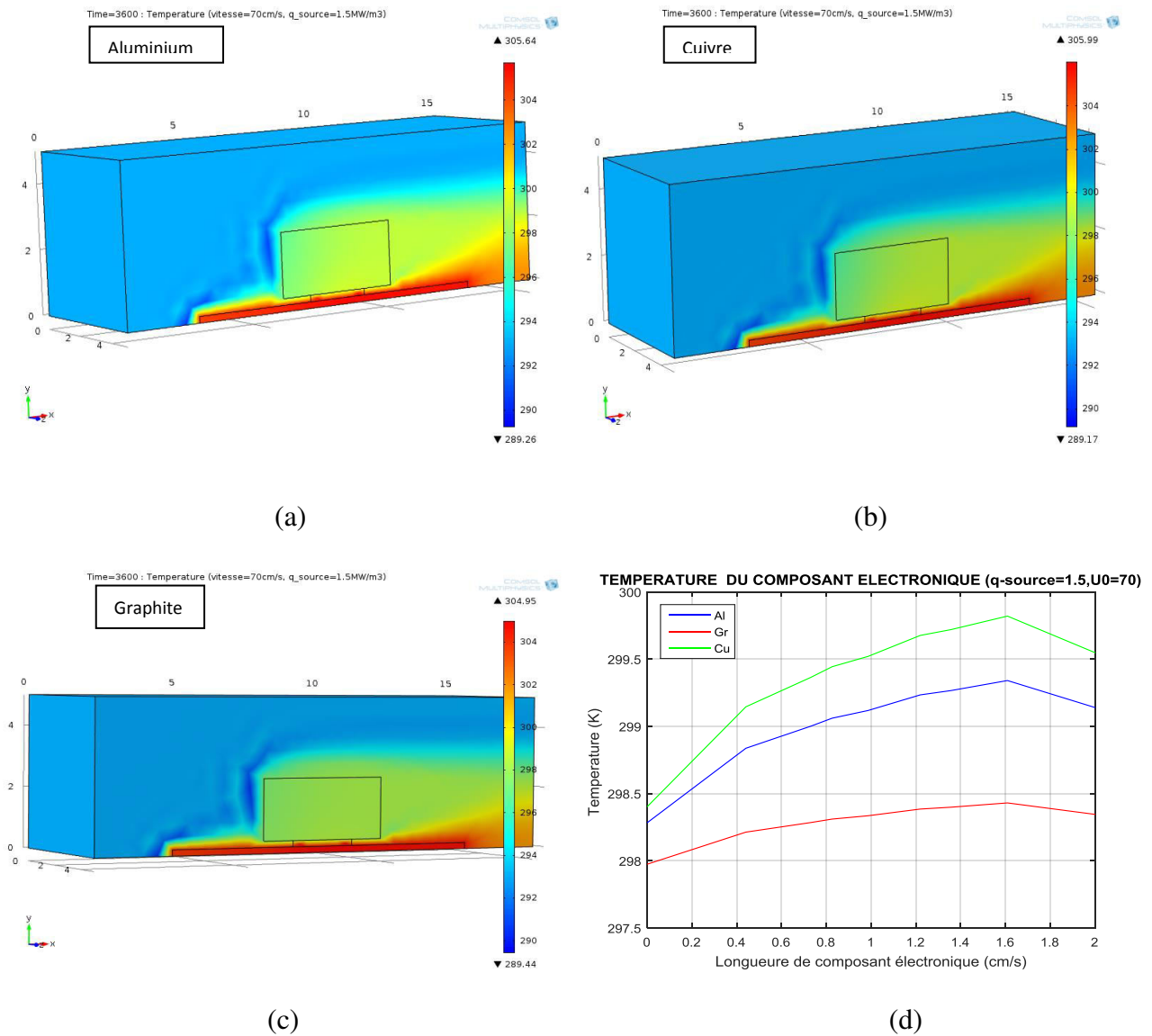


Figure IV.13: distribution de la température en 3D pour (a) l’aluminium, (b) le cuivre et (c) le graphite, (d) comparaison des profils des températures pour les trois métaux au niveau de l’interface composant-mousse métallique.

IV.4.12 Vitesses pour :  $q_{source}=1.5MW/m^3$  et  $u_0=70$  cm/s et  $t=3600s$

Aux figures (IV.14.a, b et c), la vitesse de l'air est moyenne en amont du canal (60 cm/s), faible au niveau de la mousse (20 cm/s), et forte en dessus de la mousse (165 cm/s). Ce comportement est presque identique pour les trois métaux (Aluminium, cuivre et graphite). Au niveau du plan médian de la mousse (figure IV.14.d), la comparaison des profils des vitesses, montre des profils presque identiques. Au sein de la mousse en graphite, la vitesse est légèrement plus grande que celles en aluminium et en cuivre.

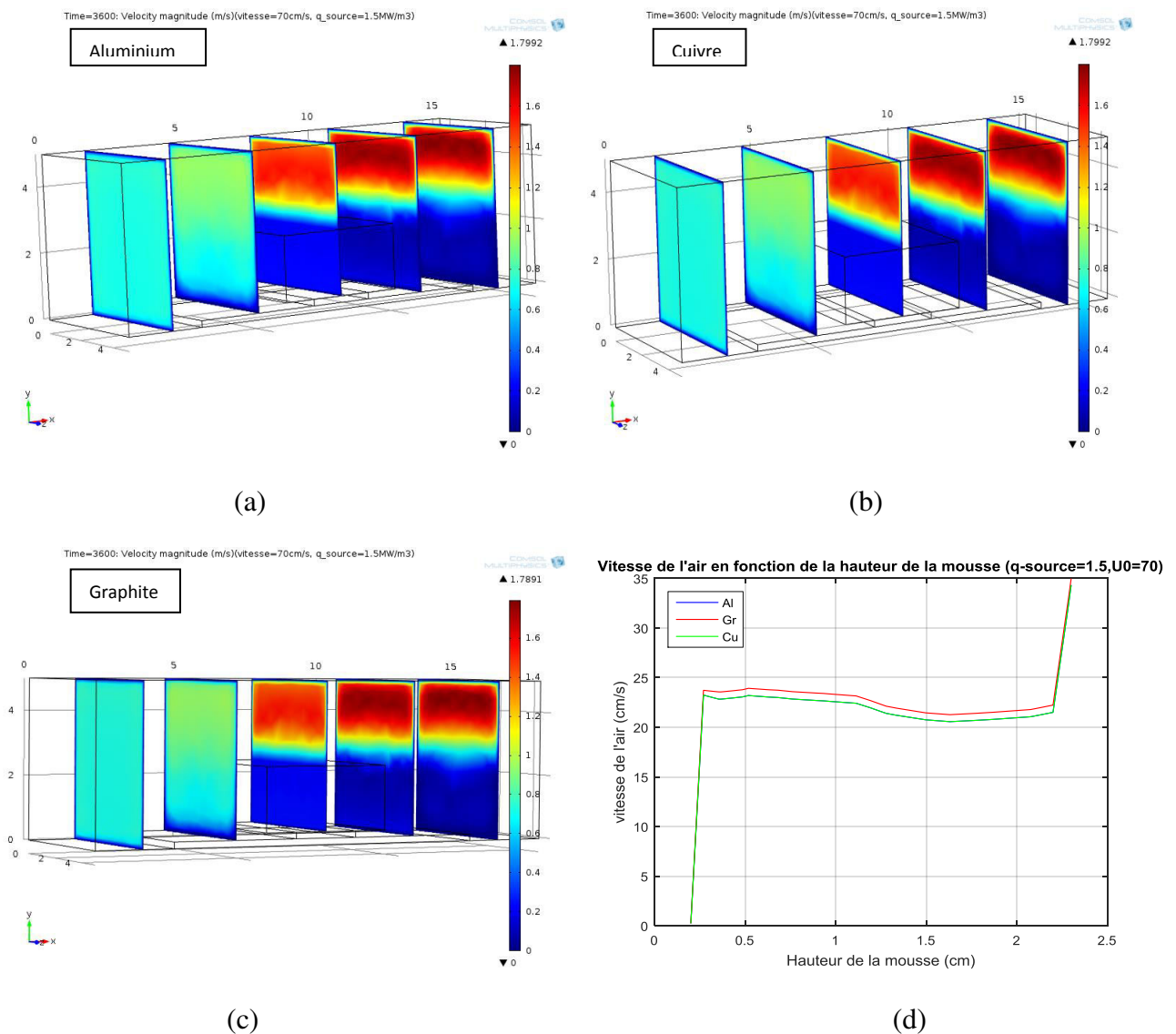


Figure IV.14 : distribution de la vitesse en 3D pour (a) l'aluminium, (b) le cuivre et (c) le graphite, (d) comparaison des profils des vitesses pour les trois métaux au niveau de centre de composant-mousse métallique.

**IV.4.13 Températures pour :  $q_{\text{source}}=1.75\text{MW/m}^3$  et  $u_0=30\text{ cm/s}$  et  $t=3600\text{s}$** 

La simulation en 3D transitoire de l'écoulement de l'air à travers le canal comportant le système plaque-composant électronique avec le dissipateur en mousse, sous les conditions d'un flux thermique du composant  $1.75\text{ MW/m}^3$  et une vitesse d'entrée  $u_0=30\text{ cm/s}$  en un interval de temps  $t=3600\text{s}$  est présentée.

Les figures (IV.15.a, b et c) représentent la distribution de la température en 3D transitoire au sein du canal sous les conditions mentionnées ci-dessus. La quatrième figure (IV.15.d) représente la comparaison des profils de température à l'interface composant-mousse métallique sous les mêmes conditions d'écoulement.

L'aval du canal et le dessus du dissipateur se trouve presque à la température ambiante, l'intégralité du flux dissipé par le composant électronique est transféré à la plaque d'une part, et absorbé par le dissipateur en mousse de l'autre part, cette partie de flux est dissipée par transfert de chaleur mixte conduction-convection envers l'air (fluide caloporteur). La phénoménologie du transport de la chaleur au sein du canal est identique pour les trois métaux (Aluminium, cuivre et graphite), la différence réside dans les valeurs des températures. On peut distinguer trois zones : zone composant-plaque, zone du dissipateur et zone amont-dessus du canal, chacune des zones se trouve à une température distincte. Pour l'aluminium, la distribution de la température dans les trois zones est respectivement : 316K, 309 et 295 K. pour le cuivre : 317K, 310 et 295 K, et pour le graphite : 315K, 308 et 292.5 K.

La comparaison des profils des températures à l'interface composant-mousse (figure IV.15.d) montre que la mousse en graphite est meilleure en refroidissement suivie par celle en aluminium, et enfin par celle en cuivre. Ce résultat est identique à celui de la simulation en 2D transitoire, ce qui donne plus de validité aux résultats de simulations en 3D.

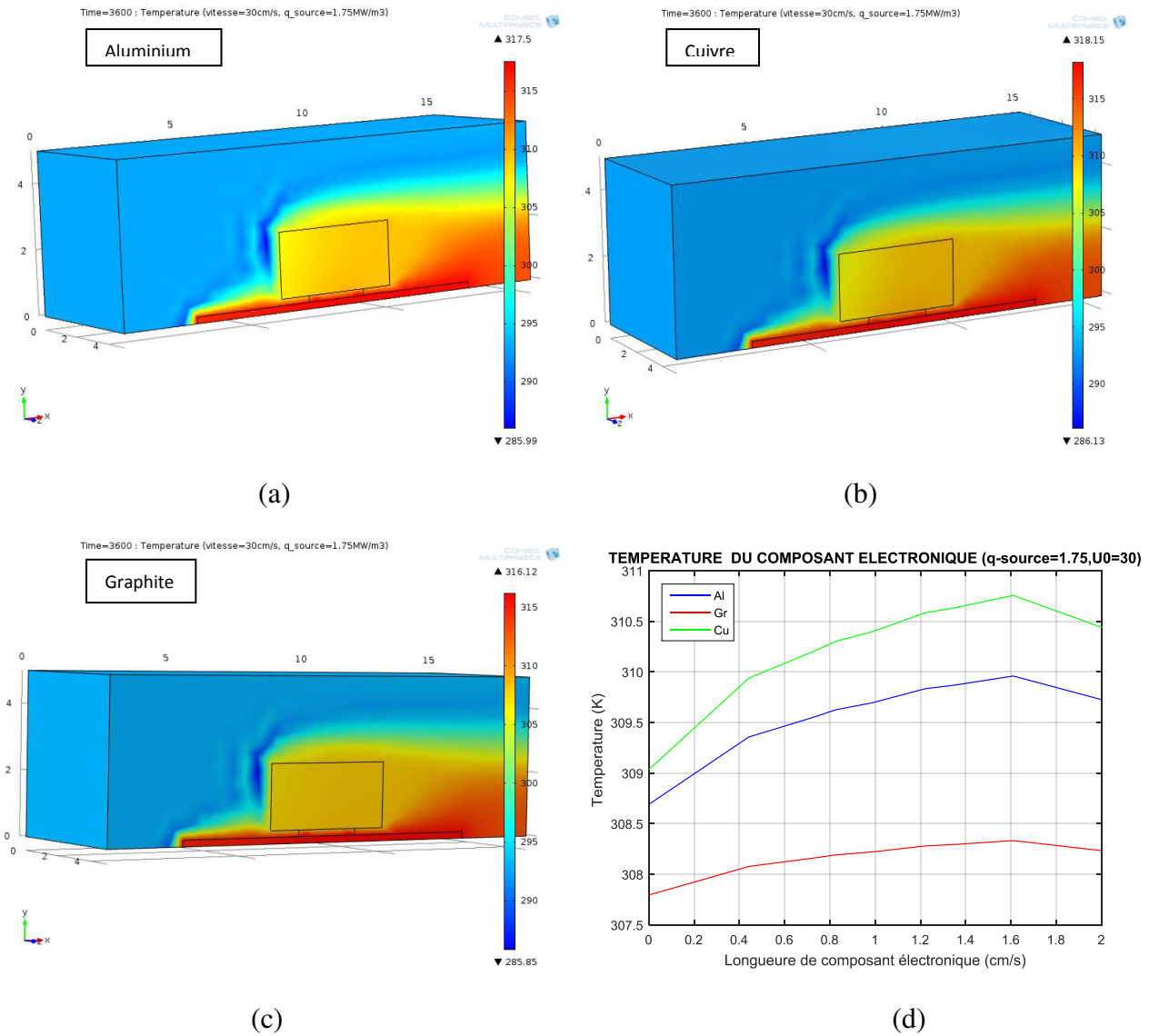


Figure IV.15: distribution de la température en 3D pour (a) l’aluminium, (b) le cuivre et (c) le graphite, (d) comparaison des profils des températures pour les trois métaux au niveau de l’interface composant-mousse métallique.

**IV.4.14 Vitesses pour :  $q_{source}=1.75MW/m^3$  et  $u_0=30\text{ cm/s}$  et  $t=3600s$**

Aux figures (IV.16.a, b et c), la vitesse de l’air est moyenne en amont du canal (30 cm/s), faible au niveau de la mousse (10 cm/s), et forte en dessus de la mousse (175 cm/s). Ce comportement est presque identique pour les trois métaux (Aluminium, cuivre et graphite). Au niveau du plan médian de la mousse (figure IV.16.d), la comparaison des profils des vitesses, montre des profils presque identiques. Au sein de la mousse en graphite, la vitesse est légèrement plus grande que celles en aluminium et en cuivre.

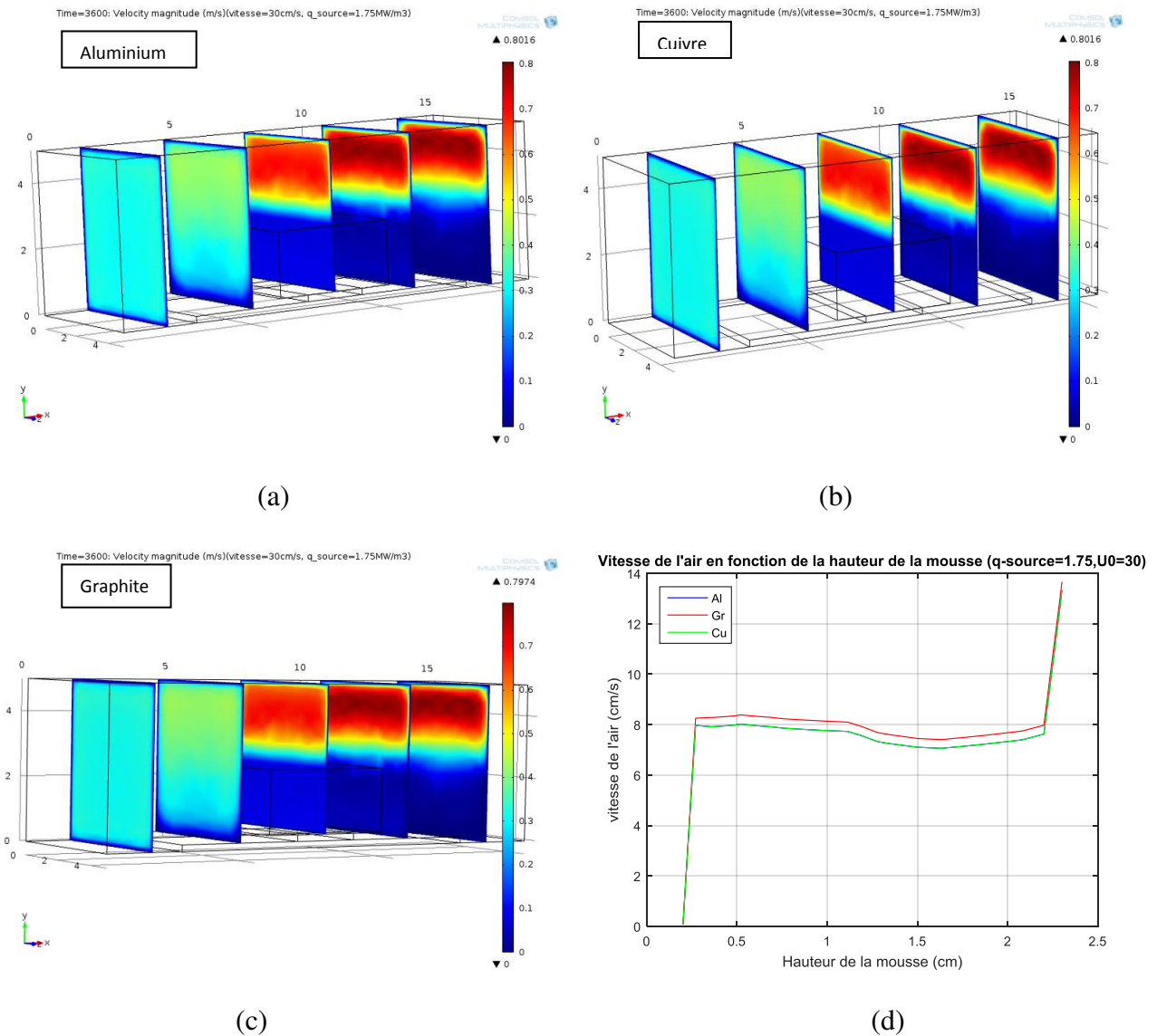


Figure IV.16 : distribution de la vitesse en 3D pour (a) l'aluminium, (b) le cuivre et (c) le graphite, (d) comparaison des profils des vitesses pour les trois métaux au niveau de centre de composant-mousse métallique.

**IV.4.15 Températures pour :  $q_{source}=1.75MW/m^3$  et  $u_0=50$  cm/s et  $t=3600s$**

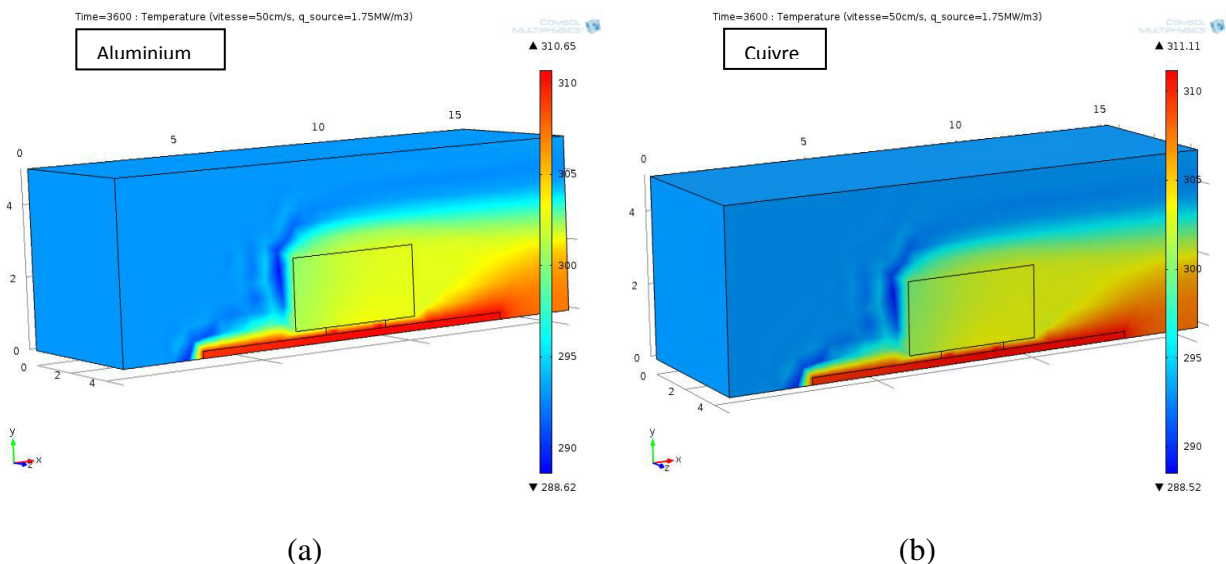
La simulation en 3D transitoire de l'écoulement de l'air à travers le canal comportant le système plaque-composant électronique avec le dissipateur en mousse, sous les conditions d'un flux thermique du composant  $1.75 MW/m^3$  et une vitesse d'entrée  $u_0=50$  cm/s en un interval de temps  $t=3600s$  est présentée.

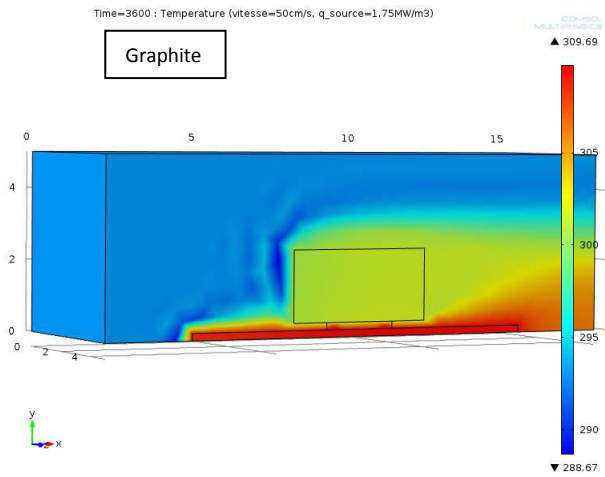
Les figures (IV.17.a, b et c) représentent la distribution de la température en 3D transitoire au sein du canal sous les conditions mentionnées ci-dessus. La quatrième figure

(IV.17.d) représente la comparaison des profils de température à l'interface composant-mousse métallique sous les mêmes conditions d'écoulement.

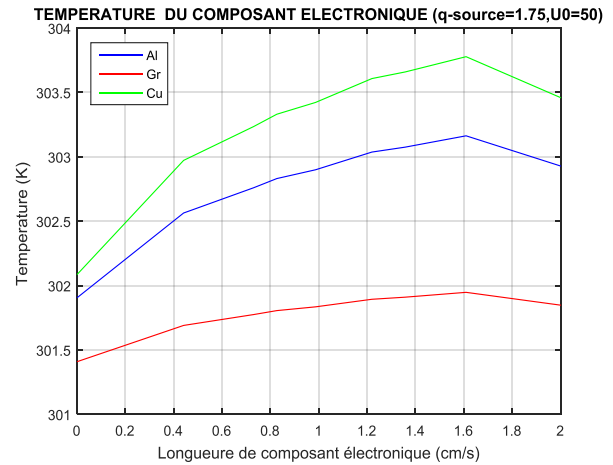
L'aval du canal et le dessus du dissipateur se trouve presque à la température ambiante, l'intégralité du flux dissipé par le composant électronique est transféré à la plaque d'une part, et absorbé par le dissipateur en mousse de l'autre part, cette partie de flux est dissipée par transfert de chaleur mixte conduction-convection envers l'air (fluide caloporteur). La phénoménologie du transport de la chaleur au sein du canal est identique pour les trois métaux (Aluminium, cuivre et graphite), la différence réside dans les valeurs des températures. On peut distinguer trois zones : zone composant-plaque, zone du dissipateur et zone amont-dessus du canal, chacune des zones se trouve à une température distinguée. Pour l'aluminium, la distribution de la température dans les trois zones est respectivement : 310K, 302 et 292.5 K. pour le cuivre : 311K, 302 et 292.5 K , et pour le graphite : 307K, 300 et 293 K.

La comparaison des profils des températures à l'interface composant-mousse (figure IV.17.d) montre que la mousse en graphite est meilleure en refroidissement suivie par celle en aluminium, et enfin par celle en cuivre. Ce résultat est identique à celui de la simulation en 2D transitoire, ce qui donne plus de validité aux résultats de simulations en 3D.





(c)

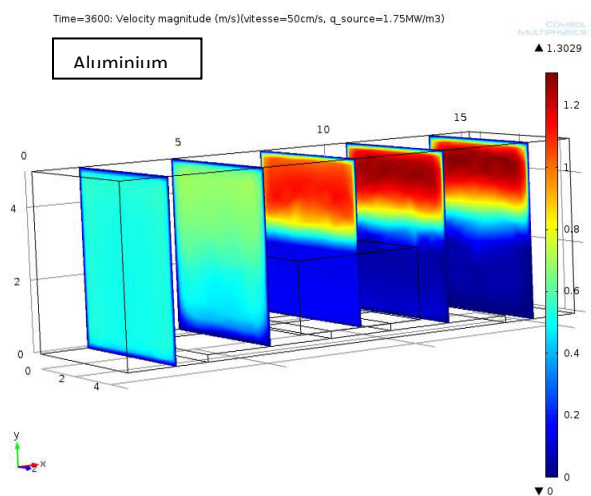


(d)

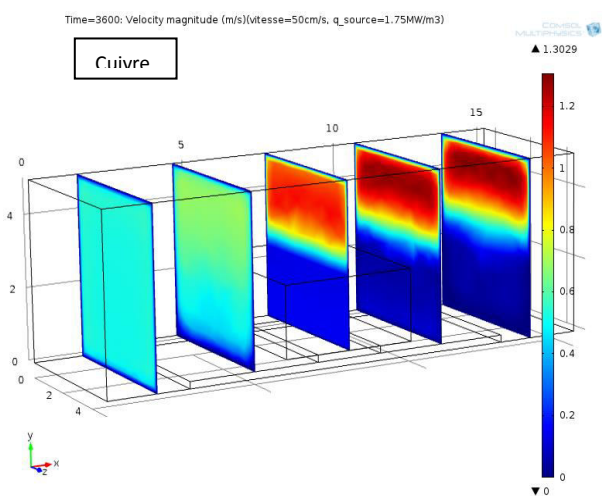
Figure IV.17: distribution de la température en 3D pour (a) l’aluminium, (b) le cuivre et (c) le graphite, (d) comparaison des profils des températures pour les trois métaux au niveau de l’interface composant-mousse métallique.

**IV.4.16 Vitesses pour :  $q_{source}=1.75MW/m^3$  et  $u_0=50\text{ cm/s}$  et  $t=3600s$**

Aux figures (IV.18.a, b et c), la vitesse de l’air est moyenne en amont du canal (45 cm/s), faible au niveau de la mousse (20 cm/s), et forte en dessus de la mousse (125 cm/s). Ce comportement est presque identique pour les trois métaux (Aluminium, cuivre et graphite). Au niveau du plan médian de la mousse (figure IV.18.d), la comparaison des profils des vitesses, montre des profils presque identiques. Au sein de la mousse en graphite, la vitesse est légèrement plus grande que celles en aluminium et en cuivre.



(a)



(b)

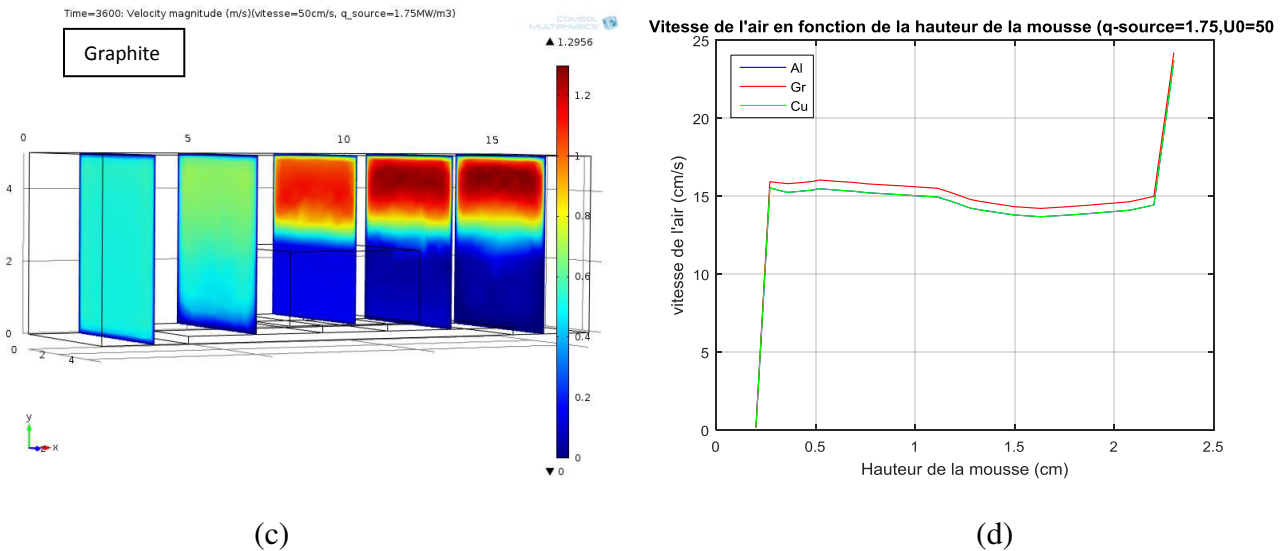


Figure IV.18: distribution de la vitesse en 3D pour (a) l'aluminium, (b) le cuivre et (c) le graphite, (d) comparaison des profils des vitesses pour les trois métaux au niveau de centre de composant-mousse métallique.

#### IV.4.17 Températures pour : $q_{\text{source}}=1.75\text{MW/m}^3$ et $u_0=70\text{ cm/s}$ et $t=3600\text{s}$

La simulation en 3D transitoire de l'écoulement de l'air à travers le canal comportant le système plaque-composant électronique avec le dissipateur en mousse, sous les conditions d'un flux thermique du composant  $1.75\text{ MW/m}^3$  et une vitesse d'entrée  $u_0=50\text{ cm/s}$  en un interval de temps  $t=3600\text{s}$  est présentée.

Les figures (IV.3.a, b et c) représentent la distribution de la température en 3D transitoire au sein du canal sous les conditions mentionnées ci-dessus. La quatrième figure (IV.3.d) représente la comparaison des profils de température à l'interface composant-mousse métallique sous les mêmes conditions d'écoulement.

L'aval du canal et le dessus du dissipateur se trouve presque à la température ambiante, l'intégralité du flux dissipé par le composant électronique est transféré à la plaque d'une part, et absorbé par le dissipateur en mousse de l'autre part, cette partie de flux est dissipée par transfert de chaleur mixte conduction-convection envers l'air (fluide caloporteur). La phénoménologie du transport de la chaleur au sein du canal est identique pour les trois métaux (Aluminium, cuivre et graphite), la différence réside dans les valeurs des températures. On peut distinguer trois zones : zone composant-plaque, zone du dissipateur et zone amont-dessus du canal, chacune des zones se trouve à une température distinguée.

Pour l'aluminium, la distribution de la température dans les trois zones est respectivement : 307K, 299 et 292 K. pour le cuivre : 308K, 300 et 292 K , et pour le graphite : 305K, 298.5 et 293 K.

La comparaison des profils des températures à l'interface composant-mousse (figure IV.17.d) montre que la mousse en graphite est meilleure en refroidissement suivie par celle en aluminium, et enfin par celle en cuivre. Ce résultat est identique à celui de la simulation en 2D transitoire, ce qui donne plus de validité aux résultats de simulations en 3D.

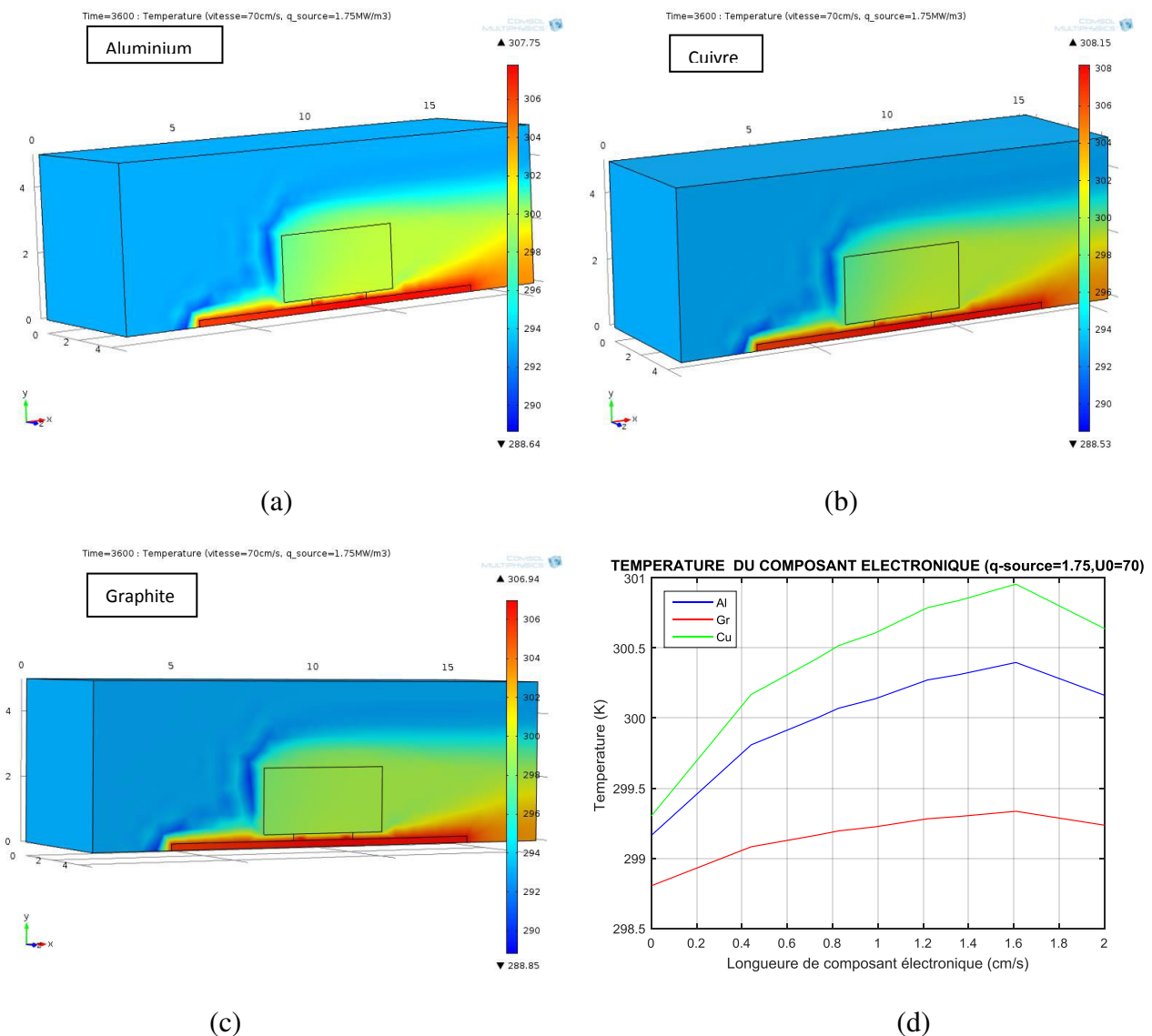


Figure IV.19: distribution de la température en 3D pour (a) l'aluminium, (b) le cuivre et (c) le graphite, (d) comparaison des profils des températures pour les trois métaux au niveau de l'interface composant-mousse métallique.

IV.4.18 Vitesses pour :  $q_{source}=1.75MW/m^3$  et  $u_0=70\text{ cm/s}$  et  $t=3600s$

Aux figures (IV.18.a, b et c), la vitesse de l'air est moyenne en amont du canal (65 cm/s), faible au niveau de la mousse (40 cm/s), et forte en dessus de la mousse (165 cm/s). Ce comportement est presque identique pour les trois métaux (Aluminium, cuivre et graphite). Au niveau du plan médian de la mousse (figure IV.18.d), la comparaison des profils des vitesses, montre des profils presque identiques. Au sein de la mousse en graphite, la vitesse est légèrement plus grande que celles en aluminium et en cuivre.

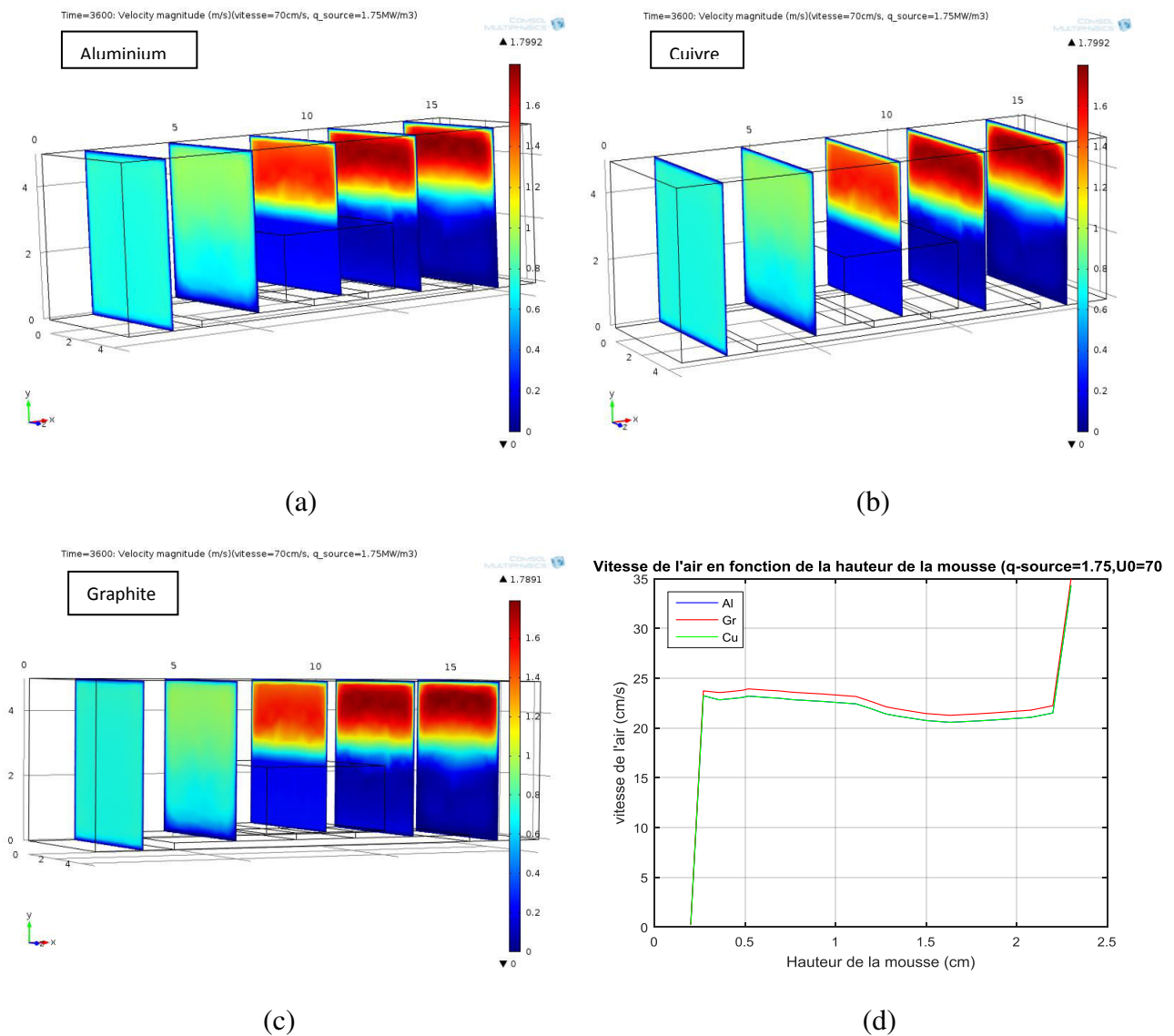


Figure IV.20: distribution de la vitesse en 3D pour (a) l'aluminium, (b) le cuivre et (c) le graphite, (d) comparaison des profils des vitesses pour les trois métaux au niveau de centre de composant-mousse métallique.

## IV.5 Conclusion

La simulation CFD par le logiciel COMSOL de l'écoulement de l'air en 3D transitoire à travers un canal muni d'un système électronique composé d'une plaque et d'un composant électronique de puissance, nous a permis de constater des constatations similaires à celles de la simulation en 2D du chapitre 3, on peut citer celles les plus marquantes :

1. Pour un flux thermique dissipé et une vitesse de l'air à l'entrée imposés, les parties les plus chaudes sont le composant et la plaque, la mousse est à une température.
2. L'effet de l'augmentation de la vitesse de l'air à l'entrée du canal va diminuer les températures des différentes zones du canal. La mousse en graphite est celle qui donne les plus basses températures du composant électronique, suivi par celle en aluminium et enfin par celle en cuivre.
3. La vitesse de l'air en amont du canal est similaire à celle d'entrée, elle est retardée au niveau de la mousse et accélérée dans la zone supérieure à la mousse. En aval du canal elle reprend un ordre de grandeur proche de la vitesse d'entrée.
4. A l'interface du composant électronique – mousse métallique, pour les trois types de matériaux (graphite, aluminium et cuivre) l'évolution de la température est croissante, avec une faible pente pour le graphite, moyenne pente pour l'aluminium et forte pente pour le cuivre.
5. La mousse en graphite est meilleure comme dissipateur pour les composants électroniques de puissance. Elle montre une capacité de refroidissement remarquable, suivi par celle en aluminium et enfin par celle en cuivre.
6. En perspective, il reste à vérifier la chute de pression au sein des trois mousses pour compléter notre étude thermohydraulique.

## Conclusion Générale

Une simulation CFD du transfert de chaleur et d'écoulement de l'air à travers un canal muni d'un système plaque - composant électronique refroidie par un dissipateur en mousse métallique a été présentée. Le modèle de Darcy-Forchheimer-Brinkman de l'écoulement de l'air au sein d'un milieu poreux a été adopté à partir de la littérature. Le logiciel multiphysique COMSOL 4.3 est utilisé pour résoudre les équations et simuler numériquement par la méthode des éléments finis le système étudié. Les effets de la vitesse de l'air (20..70 cm/s), du flux thermique dissipé par le composant électronique (150..220W) et la nature de la mousse utilisée comme dissipateur (Aluminium, Cuivre et Graphite) sur la phénoménologie du système sont examinés.

Les conclusions suivantes peuvent être mentionnées:

- L'analyse de la consistance de maillage adopté prouve que le modèle CFD réalisé par le logiciel COMSOL génère le maillage le plus efficace, ce qui donne des résultats numériques meilleurs et précis.
- Sous les conditions d'un flux de chaleur imposé constant et d'une vitesse d'air constante à l'entrée, on peut distinguer trois zones de température : la zone la plus haute est située au niveau du couple plaque-composant électronique, la zone la plus basse est située en amont du canal, et celle de température moyenne est au niveau du dissipateur en mousse métallique, qui joue le rôle d'un absorbeur de calories dissipées par le composant.
- La phénoménologie hydrodynamique de l'écoulement sous les conditions envisagées, montre que la vitesse est moyenne en amont du canal à l'entrée, faible au niveau du dissipateur en mousse, et forte en dessus de ce dernier.

- La mousse en graphite montre des capacités de refroidissement (température du composant) les plus meilleures, suivi par celle en aluminium et enfin celle en cuivre. Au contraire, cette classification est inversée pour la distribution de la vitesse ; la mousse en graphite montre des vitesses importantes au niveau de la mousse, suivi par celle en aluminium et enfin celle en cuivre.
- En perspective à ce travail, la validation des résultats de la simulation en 2D et 3D laminaire transitoire sous les mêmes conditions de transfert de chaleur et d'écoulement contre des résultats de l'expérimental doit être faite, examinée et discutée.

# *Bibliographie*

- [1] J. P. Bonnet, Phénomènes de transport dans les mousses métalliques : approche expérimentale des écoulements monophasiques et liquide-gaz. Thèse Mécanique – Energétique, Université de Provence Aix-Marseille,1. 21 Novembre 2007.
- [2]M.Benmerkhi,Transfert de chaleur et de matière dans un canal rempli partiellement d'une matière poreuse,Spécialité énergétique, option photothermique,Université Mentouri Constantine.
- [3]I.Solmus,Numerical investigation of heat transfer and fluid flow behaviors of a block type graphite foam heat sink inserted in a rectangular channel , ElsevierApplied Thermal Engineering 78 (2015) 605-615.
- [4]C.C.Chen, P.C.Huang, H.Y. Hwang, Enhanced forced convective cooling of heat sources by metal-foam porous layers, Elsevier International Journal of Heat and Mass Transfer 58 (2013) 356–373.
- [5]N.Dukhan,K.C.Chen, Heat transfer measurements in metal foam subjected to constant heat flux. Experimental Thermal and Fluid Science 32 (2007) 624–631.
- [6] CFD Module User's guide.Logiciel,Burlington,COMSOL,2012.
- [7] Introduction to COMSOL Multiphysics.Logiciel,Burlington,COMSOL,2012.
- [8] Heat Transfert Module User's Guide. Logiciel,Burlington,COMSOL,2012.
- [9] B. Buonomo, D. Ercole, O. Manca, S. Nardini, A numerical analysis on a compact heat exchanger in aluminum foam, Journal of physics, conference series 745 (2016) 032141.
- [10] Mousses métalliques.[document électronique].Troyes, UTT, <http://docplayer.fr/stroage/29/13883040/1528074267/28K26MbKpd8gZpTXV96gZQ/13883040.pdf>.

# Résumé

Nous avons présenté dans ce mémoire une simulation numérique par le logiciel COMSOL 4.3 d'une mousse métallique utilisé comme dissipateur thermique d'un composant électronique de puissance. La simulation est en 2D et 3D transitoire de l'écoulement laminaire de l'air à travers un canal muni d'un système plaque - composant électronique refroidie par un dissipateur en mousse métallique. Le but est de déterminer le comportement thermohydraulique de l'ensemble. Le dissipateur en mousse métallique est considéré comme un milieu poreux, Le modèle est de Darcy-Forchheimer-Brinkman. Nous avons discuté les effets de la vitesse (20..70 cm/s) d'entrée de l'air au canal, l'augmentation du flux dissipé par le composant électronique (150...220 W) et le type du métal du dissipateur en mousse (Aluminium, Cuivre et Graphite) sur la distribution de la température et de la vitesse au sein du canal. L'objectif est d'assurer les meilleures conditions pour un refroidissement optimal du composant électronique.

## ملخص

في هذه المذكرة قمنا بتقديم ماثلة عددية بإستعمال تطبيق كومسول 4.3 لاسفنجة معدنية مستعملة كمبرد حراري لرقيقة إلكترونية عالية الاستطاعة.

المماثلة العددية ثنائية البعد و ثلاثية البعد لسريان منتظم متعلق بالزمن خاص بالهواء داخل القناة مزودة بنظام إلكتروني مكون من صفيحة رقيقة إلكترونية مبردة بواسطة الاسفنجة المعدنية.

الهدف هو تعيين السلوك الترموهيدروليكي للنظام المدروس ,مبرد الاسفنجة المعدنية يعتبر كوسط مجوف , النموذج المستعمل هو — Darcy-Forchheimer-Brinkman

قمنا بمناقشة تأثيرات السرعة (20...70سم/ث) في مدخل القناة, و زيادة التدفق الحراري للرقيقة الإلكترونية (150....220واط) و كذلك نوع معدن الاسفنجة ( أألومنيوم, نحاس, قرافيت ) على التوزيع الحراري و السرعة داخل القناة.

الهدف هو ضمان افضل الشروط من أجل تبريد مثالي للرقيقة الإلكترونية