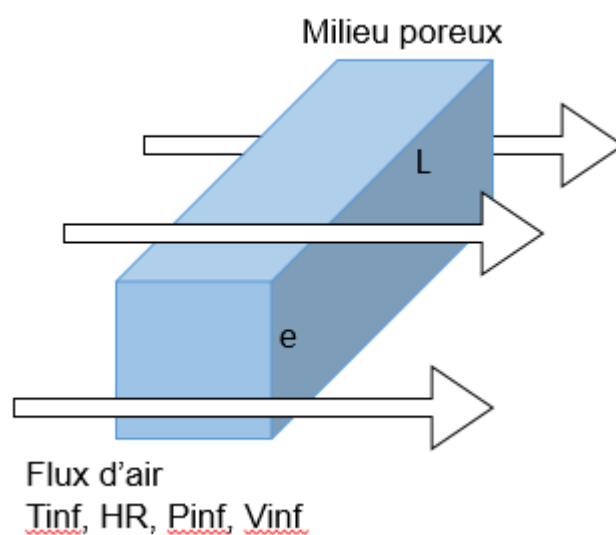


École Nationale Supérieure en Génie de Technologies Industrielles – ENSGTI

Rapport du Projet de calcul scientifique II

Simulation du transport d'humidité en milieu poreux lors d'un séchage convectif



M. Frédéric Couture
M. Stéphane Laurent
Jérémy Janin
Louis Soubigou

Pau
Avril – 2018

Table des matières

Introduction.....	2
1. Discrétisation de l'espace de travail – Réalisation du maillage.....	3
2. Organigramme.....	5
3. Présentation des résultats.....	6
Conclusion.....	10

Table des Figures

Figure 1 : Numérotation des éléments du maillage.....	2
Figure 2 : Numérotation des nœuds et détermination des numéros des nœuds m.....	4
Figure 3 : Organigramme du programme de modélisation.....	5
Figure 4 : Paramètres d'entrées de l'étude.....	6
Figure 5 : Evolution de l'humidité en fonction la vitesse de l'air ambiant.....	6
Figure 6 : Evolution de l'humidité en fonction l'humidité relative de l'air ambiant.....	7
Figure 7 : Evolution de l'humidité en fonction la température de l'air ambiant.....	7
Figure 8 : Evolution de l'humidité en fonction du paramètre β_1.....	8
Figure 9 : Profil de l'humidité du matériau à $t = 0s$.....	8
Figure 10 : Profil de l'humidité du matériau à $t = 1800s$.....	9
Figure 11 : Profil de l'humidité du matériau à $t = 5400s$.....	9
Figure 12 : Evolution de l'humidité au nœud central en fonction du temps.....	9

Introduction

Durant ce module de calcul scientifique, nous avons modélisé le transport de l'eau dans un milieu poreux exposé à un flux d'air. Pour ce faire nous allons résoudre l'équation de conservation de la masse (équation (4) du polycopié de présentation du problème) en l'intégrant sur l'espace et sur le temps.

Pour l'intégration en temps, nous avons utilisé un schéma semi-implicite pour la partie parabolique de l'équation et explicite pour les conditions limites.

Nous avons mis en place la méthode des éléments finis (P1) pour discrétiser l'espace de travail.

Ce rapport détaillera dans un premier temps la discrétisation de l'espace à modéliser, puis nous vous présenterons l'organigramme de notre programme. Enfin nous vous exposerons nos résultats, et les variations de ces résultats en fonction des paramètres d'entrées.

1. Discrétisation de l'espace de travail - Réalisation du maillage

Pour permettre la simulation du transport d'humidité dans notre milieu poreux, nous devons discrétiser l'espace occupé par ce milieu. Cela consiste à créer un maillage qui déterminera les points d'espace sur lesquelles nous allons résoudre notre système d'équations différentielles.

L'espace à considérer dans ce projet est un parallélogramme de longueur L , de largeur l_r et d'épaisseur e . Pour limiter le temps de calcul et simplifier notre approche, nous allons plutôt effectuer l'étude du séchage sur le plan ($L \times e$).

Tout d'abord nous demandons à l'utilisateur le nombre d'éléments suivant l'axe des x (M_{\max}) et suivant l'axe des z (N_{\max}). Ces nombres d'éléments doivent être impairs pour garantir la symétrie des résultats et l'efficacité du maillage pour les éléments limites.

Connaissant le nombre d'éléments, nous avons décidé de les numéroté de la manière suivante :

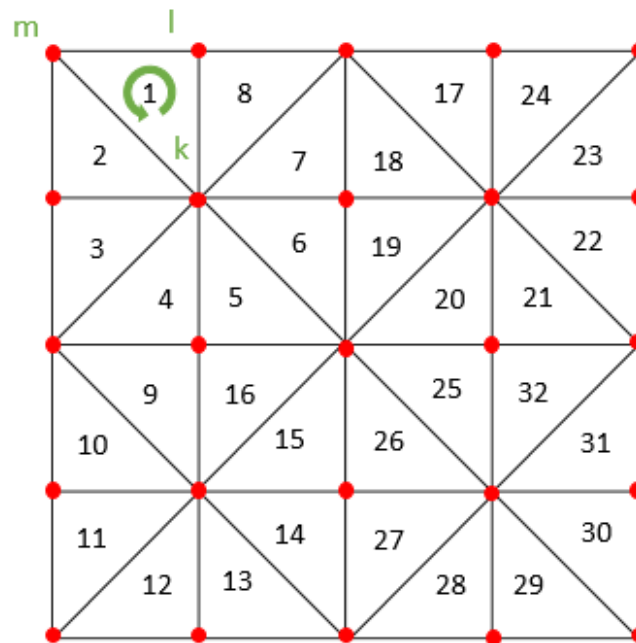


Figure 2 : Numérotation des éléments du maillage

On découpe le maillage en carré de 8 éléments, puis on les numérote dans le sens trigonométrique en commençant par l'élément en haut à gauche.

Nous avons également retenu le sens trigonométrique pour numéroté les nœuds k , l , m de chaque élément.

Un des avantages de notre maillage est qu'il nous permet d'avoir, pour les 8 éléments d'un "carré", le même nœud k et d'avoir en nœuds limites uniquement les nœuds l et m. Cela simplifie grandement le calcul du tableau de connexité et du second membre B.

Il vient également que le nœud m de l'élément i est aussi le nœud l de l'élément i+1.

Pour compléter le tableau de connexité, il ne manque donc plus qu'à associer les nœuds m avec leur numéro. Pour ce faire nous avons effectué des tests et des calculs à partir du nœud central k :

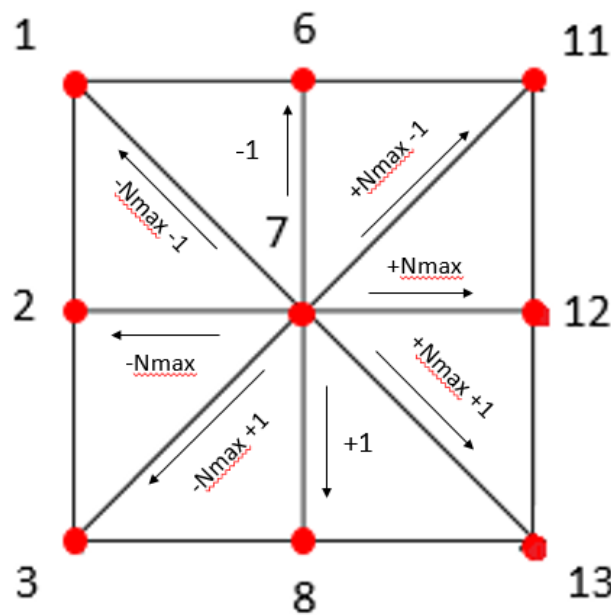


Figure 2 : Numérotation des nœuds et détermination des numéros des nœuds m.

Par exemple, si nous traitons l'élément 3, son nœud m est le nœud numéro 3. Nous allons retrouver ce numéro en soustrayant au numéro du nœud central la valeur $N_{max}-1$ (ici $7-5+1=3$).

Pour couvrir tout le maillage, nous avons translaté cette suite de 8 opérations selon l'axe des z, en ajoutant +2 au numéro du nœud central, et selon l'axe des x, en ajoutant $2*N_{max}$.

2. Organigramme

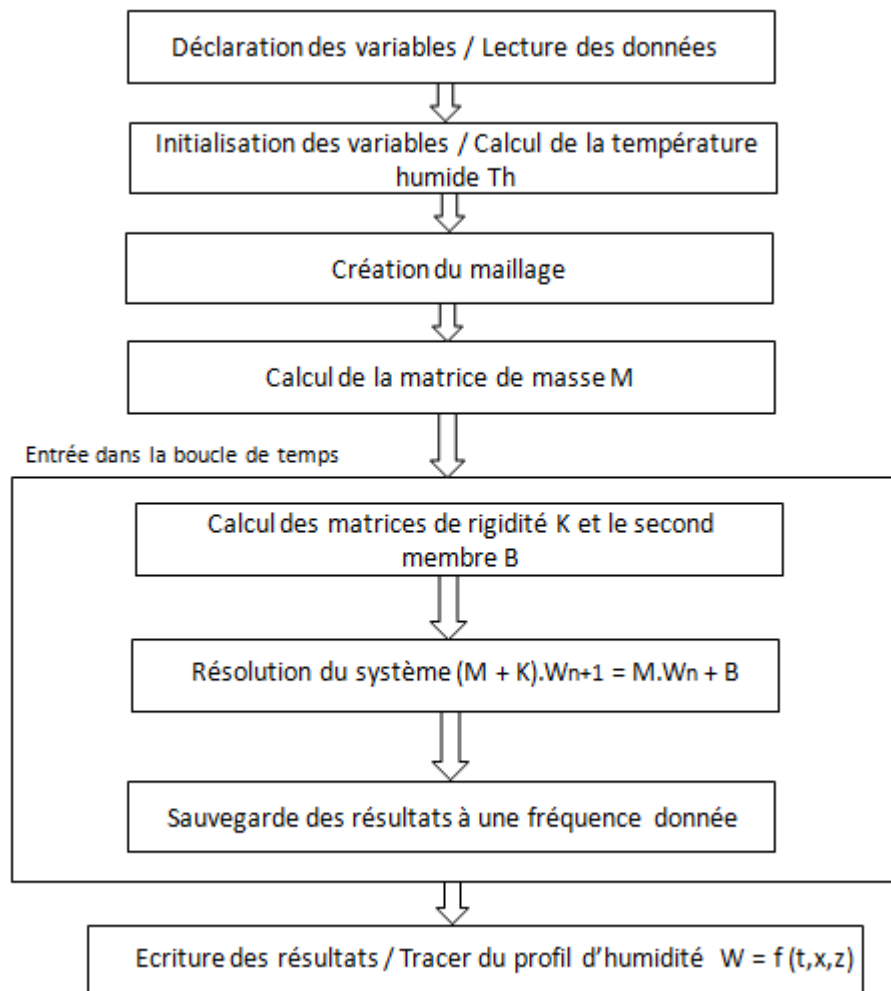


Figure 3 : Organigramme du programme de modélisation

À noter que des sécurités ont été ajoutées lors de la lecture des données pour s'assurer que les valeurs rentrées par l'utilisateur sont effectivement dans les domaines de définition posés dans le paragraphe **Données** du polycopié de présentation du problème.

Le calcul de la température humide est effectué par la méthode de Newton-Raphson et le coefficient d'échange thermique est obtenu à partir de corrélation reliant le nombre de Nusselt aux nombres de Reynolds et de Prandtl (cf. cours de transfert convectif de chaleur et de matière).

Enfin, pour résoudre notre système d'équations différentielles nous avons utilisé la méthode de Choleski car elle nous permet d'avoir *in fine* le temps de calcul le plus court. Il est également possible de demander au programme d'arrêter le calcul lorsque la convergence est atteinte.

3. Présentation des résultats

À partir des données proposées en cours, nous avons fait varier un à un certains paramètres d'entrées pour tester la validité de notre programme. Les résultats présentés ci-dessous sont pris pour le nœud central à $t = 1800$ s :

non	Calcul de Th par itération [oui/non]
41.3	Th imposé par l'utilisateur si non à la réponse précédente
21	Nombre de pas d'espace suivant l'axe x [Nx]
11	Nombre de pas d'espace suivant l'axe z [Nz]
0.01	Epaisseur [m] [0.01;0.1]
0.02	Longueur [m] $L=a*e$ avec a [1,10]
18000	Nombre de pas de temps [SU]
18000	Durée Totale [s]
900	Période d'enregistrement des données dans le fichier excel [s]
txt	Type de fichier d'enregistrement [txt/xls]
0.6	Teneur en eau initial [SU] [Weq;1]
0.3	Teneur de saturation en eau liée [SU]
500	Masse volumique du produit sec [Kg/m ³]
9.81	gravité [m/s ²]
0.018	Masse molaire vapeur [Kg/mol]
8.3143	Constante des gaz parfaits [J/(K*mol)]
2	Vitesse de l'air ambiant [m/s] [1,6]
358.15	Température de l'air ambiant [K] [293.15;353.15]
0.150	Humidité relative de l'air ambiant [SU] [0.05;0.95]

Figure 4 : Paramètres d'entrées de l'étude

Tout d'abord on observe une corrélation linéaire entre l'humidité au centre du matériau et la vitesse du flux d'air ambiant :

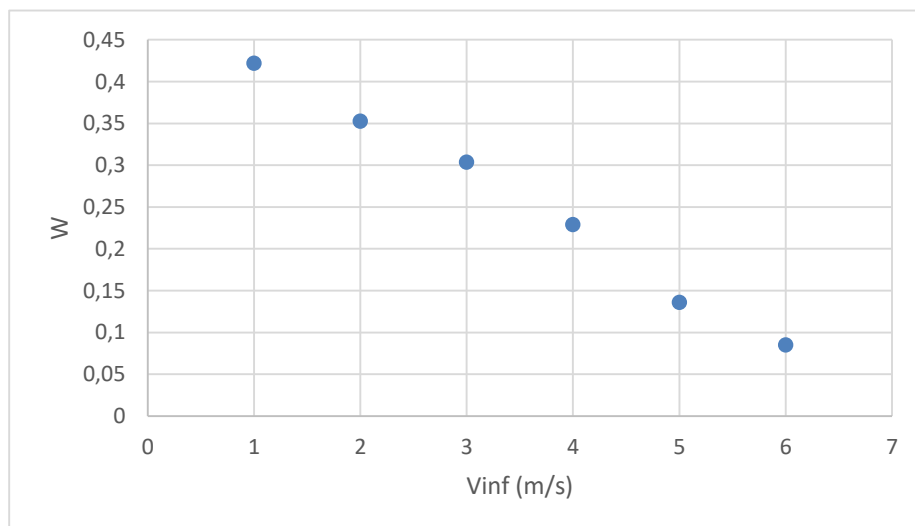


Figure 5 : Evolution de l'humidité en fonction la vitesse de l'air ambiant

Cette fonction décroissante corrobore avec le fait qu'une augmentation de la vitesse de l'air entraîne un flux d'évaporation plus important.

On obtient une corrélation inverse si on augmente l'humidité relative de l'air :

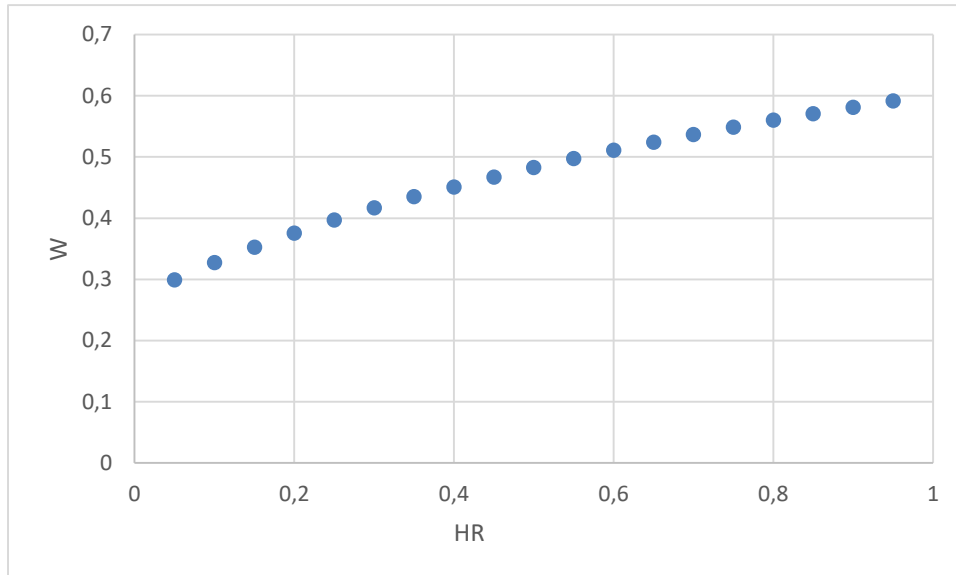


Figure 6 : Evolution de l'humidité en fonction l'humidité relative de l'air ambiant

L'accroissement de l'humidité relative de l'air rend le transport de l'eau hors du milieu plus difficile.

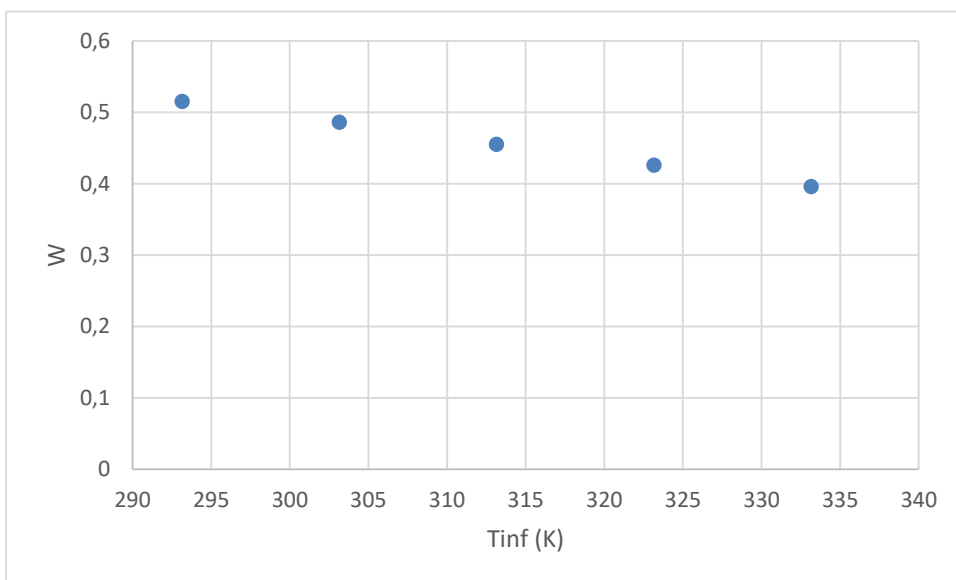


Figure 7 : Evolution de l'humidité en fonction la température de l'air ambiant

L'humidité décroît linéairement avec la température. Cela semble correspondre à la physique du problème, quand la température de l'air ambiant augmente, le séchage est plus rapide.

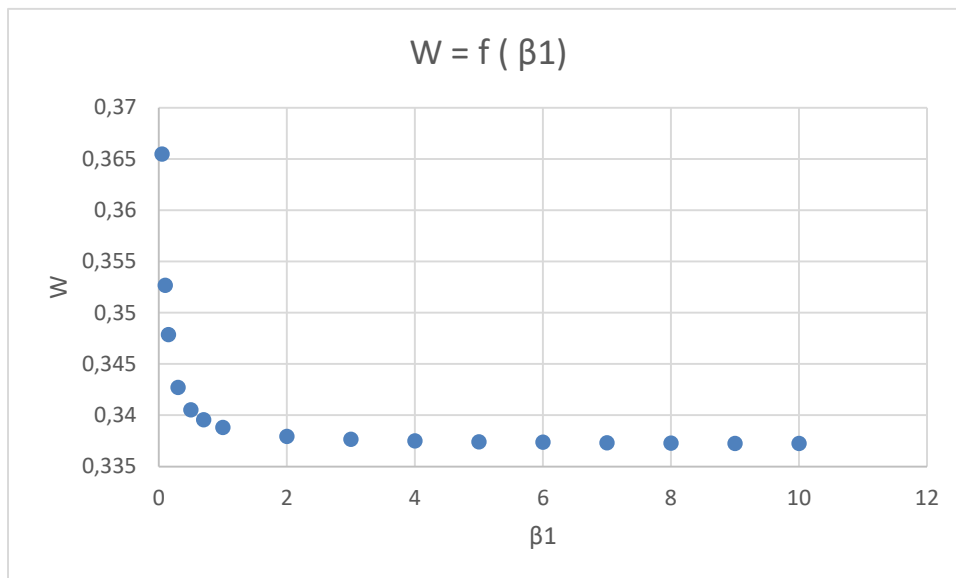


Figure 8 : Evolution de l'humidité en fonction du paramètre β_1

On observe sur la figure 8 que pour des valeurs de β_1 comprises entre 1 et 10 impactent peu sur l'humidité du matériau. En revanche on remarque que pour des valeurs comprises entre 0,1 et 1, le profil d'humidité est plus prononcé mais la valeur de l'humidité augmente à mesure que β_1 se rapproche de 0.

Pour une valeur de β_1 inférieur à 0,01, nous observons des oscillations numériques dans nos résultats.

Pour les données présentées dans la figure 4, nous avons relevé les profils d'humidité du matériau à différents temps :

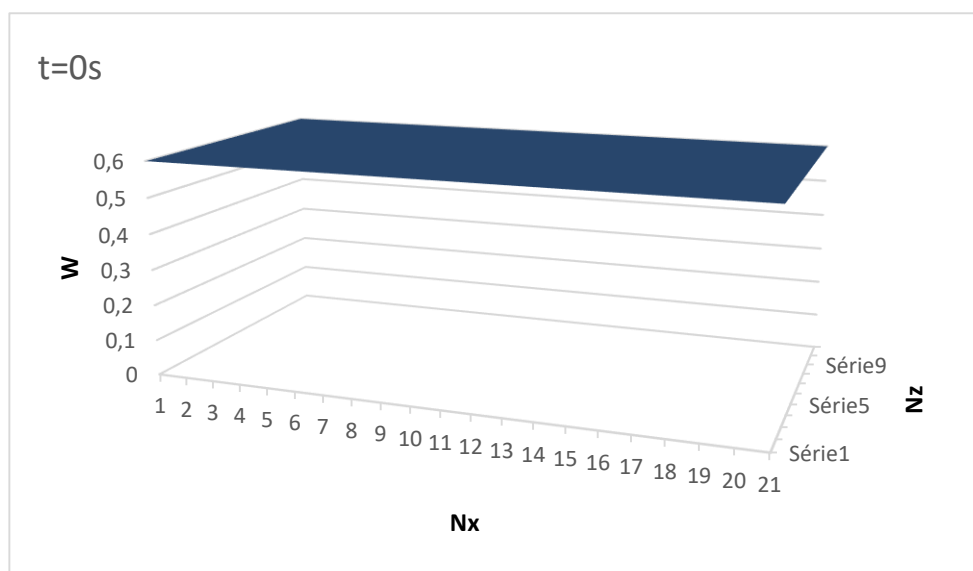


Figure 9 : Profil de l'humidité du matériau à $t = 0s$

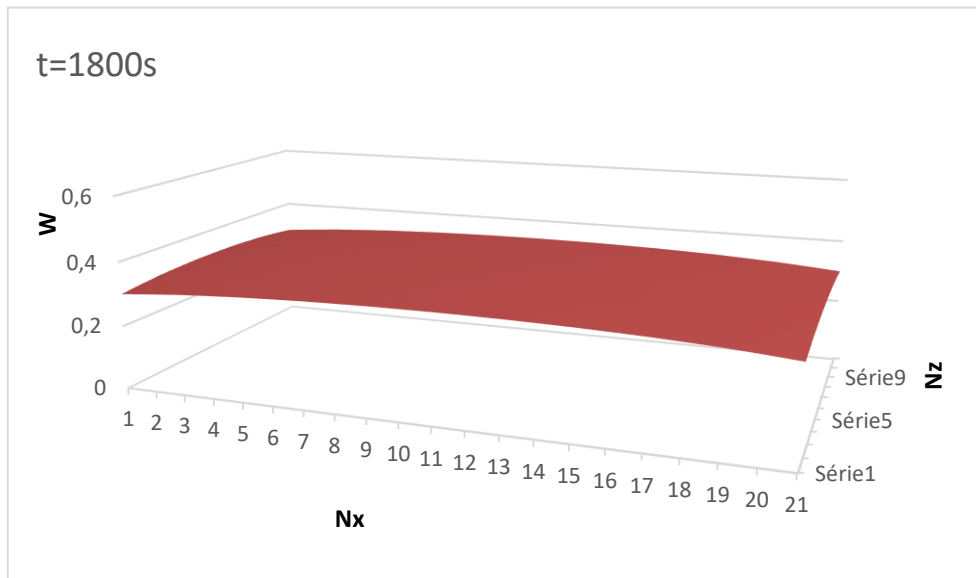


Figure 10 : Profil de l'humidité du matériau à t = 1800s

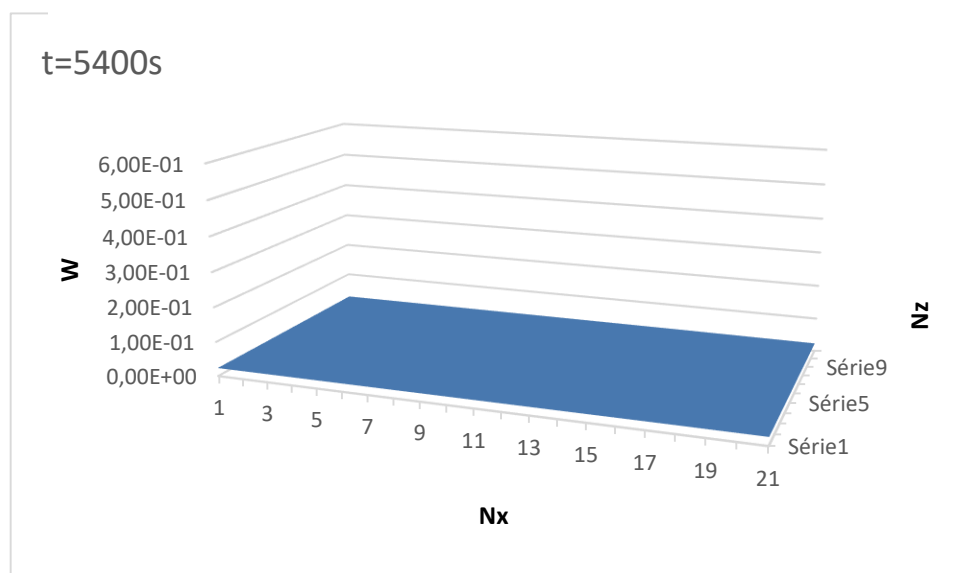


Figure 11 : Profil de l'humidité du matériau à t = 5400s

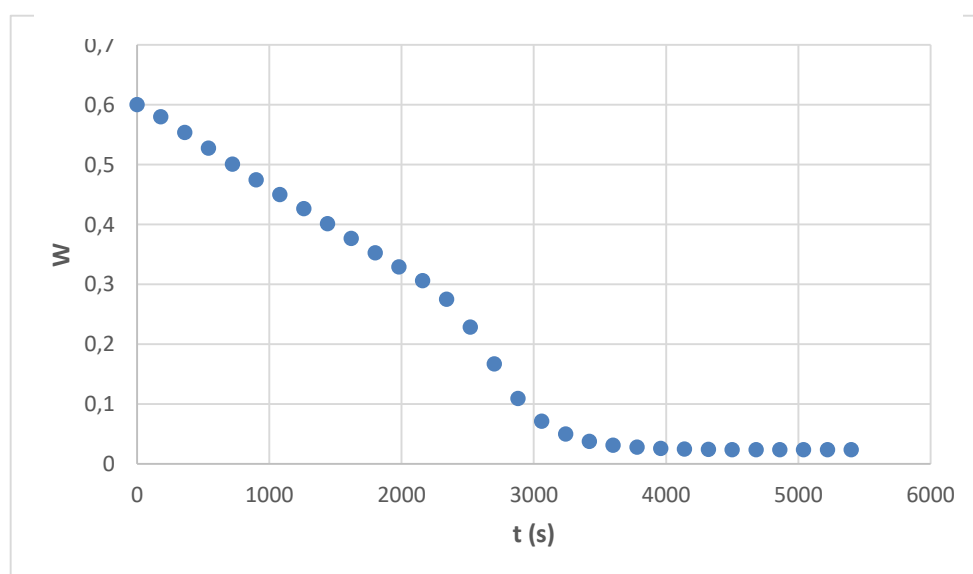


Figure 12 : Evolution de l'humidité au nœud central en fonction du temps

Conclusion

Au cours de ce projet, nous avons simulé le transport de l'humidité en milieu poreux lors d'un séchage convectif. Les schémas d'intégration et l'organigramme établis nous ont permis d'aboutir à des profils d'humidité cohérents avec la physique du problème.

Il aurait été intéressant de comparer nos résultats avec un logiciel de simulation numérique du commerce tel que ANSYS Fluent et avec l'expérience.