

Simulation Numérique Et Modélisation Par La Méthode Du Réseau De Neurones Artificiels Du Rendement Des Filtres Granulaires De Granite

RATIAISON Calvin¹, RABEHARISOA Jean Marc², RANDRIANARISON Hervais Dieu Donné³,
RATIAISON Adolphe Andriamanga⁴

^{1,2,3,4}Laboratoire de la Dynamique de l'Atmosphère, du Climat et des Océans (DyACO), Université d'Antananarivo,
Madagascar, B.P 906

Correspondances, Courriels :

rarcavingt@gmail.com¹, jmrabeharisoa@gmail.com², hervarandria@yahoo.com³,
adolphe.ratiarison@univ.antenanarivo.mg⁴

Auteur correspondant : RATIAISON Calvin. E-mail : rarcavingt@gmail.com



Résumé: Cet article présente la simulation numérique des filtres granulaires de fumée industrielle. Les filtres étudiés ont une forme parallélépipédique et contiennent chacun d'un lit des grains fixes. Les grains utilisés sont des graviers de granites de taille variant de 1 à 9 cm. En travaillant avec la simulation numérique, nous avons obtenu des résultats de l'efficacité selon la catégorie des filtres. Les efficacités de ces filtres sont respectivement 62,96 %, 59,08 %, 65 %, 51,45 % et 11,20 %. Nous avons ensuite modélisé les rendements des filtres simulés en fonction de tous les paramètres d'entrée de simulation avec la méthode du réseau de neurones artificiels. Les résultats du modèle obtenus sont identiques à ceux des simulations.

Mots clés : Simulation numérique, filtres granulaires, fumée, rendement, modélisation, réseau de neurones artificiels.

Abstract: This paper presents the numerical simulation of granular industrial smoke filters. The filters studied have a parallelepiped shape and each contain a bed of fixed grains. The grains used are granite gravel ranging in size from 1 to 9 cm. Using numerical simulation, we obtained efficiency results according to filter category. The efficiencies of these filters are 62.96 %, 59.08 %, 65 %, 51.45 % and 11.20 % respectively. We then modelled the efficiencies of the simulated filters as a function of all the simulation input parameters using the artificial neural network method. The results of the model obtained are identical to those of the simulations.

Keywords : Numerical simulation, granulars filters, smoke, yeld, modelisation, artificial network.

1. INTRODUCTION

Le filtre de fumée industrielle est un organe installé après la chaudière dans une centrale thermique avec récupération d'énergie [1]. Plusieurs chercheurs ont participé à l'étude de cette unité. Les fruits des différents études effectuées mènent aux différents types de filtres de fumée des usines d'incinération. Il y a déjà eu des électrofiltres [2], des filtres à manches [3], des filtres céramiques [4], etc. Les avantages de ces filtres sont nombreux [1]. Pourtant, leurs inconvénients sont complexes, irrémédiables et persistes sur la conception, la réalisation, le ramonage, l'entretien et sur la durée de vie. C'est pourquoi notre imagination s'adresse en un filtre granulaire en granite. Sous – prétexte de sa nouveauté dans le domaine énergétique d'une centrale thermique, des questions se posent sur sa conception, son dimensionnement, son rendement, sa faisabilité puis sur ses avantages supplémentaires tels que le ramonage, l'entretien et la durée de vie. Nous allons chercher des résultats fiables correspondant à ces problématiques ainsi posés

avec la simulation numérique et la modélisation de son efficacité par la méthode de réseau de neurones artificiels afin de prédire sa praticité et de réduire l'émission des aérosols de fumée nocifs et polluants notre atmosphère.

2. METHODES ET MATERIELS

2.1. Méthodes et matériels

Nous avons utilisé la simulation numérique sous le code de l'ANSYS Fluent qui utilise la méthode des volumes finis [5] et le modèle $k - \varepsilon$ avec un schéma numérique "couplage". Les données de simulation ainsi obtenues sont exportées et traitées dans la fenêtre de Matlab. Le tableur Excel est utilisé comme sous – traitants de Matlab.

2.2. Équations mathématiques

2.2.1. Équations de conservation

Sachant que la fumée est un fluide compressible. Les équations de conservation intervenant dans cette étude sont l'équation de continuité (1) [6] et l'équation de conservation de quantité de mouvement (2) [6] ainsi que l'équation de chaleur (3) [7].

$$\phi \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla (\rho U) = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left(\frac{\partial U}{\partial t} + (U \cdot \nabla) U \right) + \nabla p = \rho g \quad (2)$$

$$(\rho c_p)_f \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} + U \nabla T_f \right) = \nabla (\lambda_{eff} \nabla T_f) + h_{sf} a_{sf} (T_s - T_f) \quad (3)$$

Où ϕ : porosité, ρ : masse volumique [kg/m^3], U : vitesse [m/s], p : pression [Pa], g : intensité de pesanteur [N / kg]. Dans l'équation (3), T_f : température de fumée [K], T_s : température des grains solides [K], $(\rho c_p)_f$: capacité thermique volumique [$\text{J} / \text{m}^3 / \text{K}$], h_{sf} : coefficient d'échange thermique de fumée – grains [$\text{W} / \text{m}^2 / \text{K}$] et a_{sf} : surface spécifique d'échange par unité de volume [m^{-1}].

2.2.2. Équation de transport et du dépôt des nanoparticules de fumée

Dans cette étude, l'équation du transport et de la cinétique du dépôt des nanoparticules de fumée en suspension dans un filtre granulaire est décrite par l'équation (4) [8, 9].

$$\frac{\partial v}{\partial t} + U_x \frac{\partial v}{\partial x} + U_y \frac{\partial v}{\partial y} = D \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - k_{dep}(x, y) v \quad (4)$$

Où v : fraction volumique d'une nanoparticule de fumée, U : vitesse, D : coefficient de diffusion et k_{dep} : coefficient du dépôt des nanoparticules.

2.2.3. Équation de Darcy

La vitesse d'écoulement de fumée dans le filtre granulaire est régie par l'équation de Darcy dans un milieu poreux, s'écrivant selon l'équation (5) [10] :

$$U = -\frac{k_p}{\mu} \nabla p \quad (5)$$

Où k_p : coefficient de perméabilité [m^2], μ : viscosité dynamique de l'air porteur de fumée [$kg / m / s$].

2.3. Grains de granite capteurs de fumée dans le filtre

Les grains de granite sont des granulats obtenus après le taillage de gros pierre granitique. Ils peuvent être cubiques, parallélépipédiques, sphériques, cylindriques ou polyédriques. Leur diamètre moyen est compris entre 1 et 120 mm [11]. Leurs surfaces latérales sont rugueuses et favorisent la capture des nanoparticules de fumée. La hauteur de leur rugosité naturelle mesure de 0,5 à 5 mm [12]. Ils ont les mêmes propriétés et les mêmes compositions que les granites grossiers. Ils sont utilisés dans des centrales géothermiques pour le stockage des fluides extrêmement chaud et dans des foyers de cuisines pour les socles de résistance de chauffage. Leurs propriétés sont regroupées dans le tableau 1.

Tableau 1 : Propriétés de granite

Propriétés de granite	Valeur	Unité
Masse volumique [13]	2650 à 2750	kg / m^3
Capacité thermique [14]	790 à 840	$J / kg.K$
Conductivité thermique [14]	2,5 à 3,5	$W / m.K$
Résistivité thermique [15]	0,28 à 0,40	$m.K / W$
Durée de vie [16]	+100 à +200	<i>ans</i>

2.4. Filtre granulaire en granite

Le filtre granulaire en granite est un milieu poreux homogène dont les pores sont interconnectés et vides. Il est destiné pour réduire l'émission des particules de fumée dans l'atmosphère, à souligner le dioxyde de carbone (CO_2), le monoxyde de carbone (CO), le carbone de suies (C), le chlorure d'hydrogène (HCl), les oxydes d'azote et de soufre (NO_x , SO_x) [1].

2.5. Simulation numérique de filtre granulaire

2.5.1. Géométrie du domaine

Nous avons étudié un filtre granulaire parallélépipédique de longueur L , de largeur l et de hauteur H . A l'intérieur, Il est constitué des grains de granite cubique d'arête a , fixes, jouant un rôle de capteur des nanoparticules de fumée. Ces grains sont organisés en quinconce et espacés par des petites distances Δx , Δy et Δz . Ces distances sont identiques et constituent des pores. Ce système est assimilable à un milieu poreux dont la géométrie est illustrée par la figure 1.

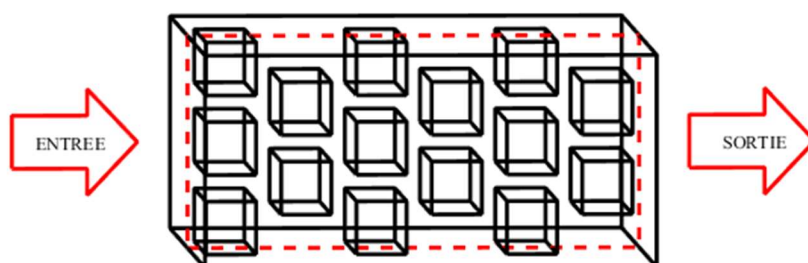


Figure 1 : Géométrie 3D de filtre granulaire de fumée en granite

Les flèches d'entrée et de sortie indiquent le sens d'écoulement de fumée traversant le filtre. Dans cette étude, les dimensions du filtre sont de 0,5 m de longueur, 0,2 m de largeur et de 0,2 m de hauteur. Nous avons simulé cinq catégories de ce filtre. L'avantage n'est pas seulement un filtre de fumée, mais aussi la facilité de ramonage des suies par pompe à air, pompe à eau ou eau à verser sans pompe. Ce système est construit avec des matériaux locaux, sans exigence de taille. Il a une longue durée de vie et une bonne résistance à la température. En plus, les risques d'incendie ne sont pas catastrophiques.

Afin de minimiser des lourds calculs, nous travaillons dans un plan à deux dimensions (2D). En effet, nous considérons la partie rouge en traits discontinus de la figures 1.

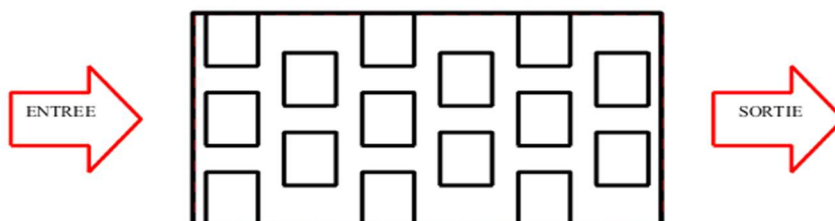


Figure 2 : Géométrie 2D de filtre granulaire de fumée en granite

2.5.2. Maillage du domaine

Le type de maillage utilisé est le maillage triangulaire à cause de la facilité de raffinement autour des grains. La statistique de maillage pour chaque catégorie des filtres est regroupée dans le tableau 2.

Tableau 2 : Statistique de maillage

Filtre	Nœuds	Éléments
F1	82 789	190 467
F2	84 190	131 570
F3	83 598	141 853
F4	72 748	129 057
F5	67 562	123 294

2.5.3. Raffinement du maillage

Le raffinement du maillage discrétise au profond les éléments de contrôle à taille plus en plus petite. Il rend le résultat de simulation proche de la réalité. Malheureusement, le coût de calcul devient plus lourd. La figure 3 montre le raffinement de maillage autour des obstacles granulaires de filtre. Elle illustre la qualité de maillage du domaine des filtres F1, F2, F3, F4 et F5. Nous avons utilisé le raffinement fractionné local pour avoir une bonne qualité de maillage surtout autour des obstacles granulaires captant la fumée et pour minimiser le coût de calcul. C'est pourquoi le maillage devient plus en plus raffiné vers la paroi des obstacles

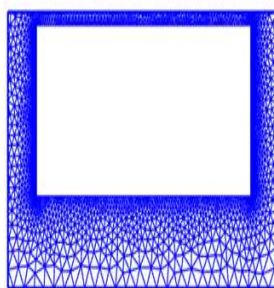


Figure 3 : Raffinement de maillage autour d'un obstacle

2.5.4. Conditions aux limites

Les conditions aux limites concernent la géométrie du domaine et sont présentées dans le tableau 3.

Tableau 3 : Conditions aux limites de filtre

Géométrie	Conditions aux limites	Observation	Paramètre
Faces latérales de filtre	Wall	Les 4 parois latérales	Température ambiante
Faces latérales des grains	Wall	Les 6 parois latérales	Température ambiante
Face d'entrée	Inlet	Une section d'entrée	Toutes variables d'entrée
Face de sortie	Outlet	Une section de sortie	Pression nulle

2.5.5. Conditions initiales

Les conditions initiales de nos simulations sont affichées dans le tableau 4.

Tableau 4 : Conditions initiales de filtre granulaires

Filtre	Porosité [%]	Arête des grains [m]	Largeur des pores [m]	Vitesse de fumée [m/s] [17]	Température des parois [°C]	Rugosité granulaire [m]	Température de fumée [°C] [1]
F1	10	0,01	0,00050	0,0050	25	0,001	80
F2	15	0,02	0,00180	0,0045	20	0,002	90
F3	20	0,03	0,00375	0,0040	15	0,003	100
F4	25	0,04	0,00550	0,0035	10	0,004	110
F5	30	0,05	0,01200	0,0030	05	0,005	120

En plus, les constituants de fumée entrant dans le filtre sont estimés en fraction volumique [1] et présentées dans le tableau 5.

Tableau 5 : Fraction volumique des constituants de la fumée

Filtre	CO ₂	CO	C	O ₂	N ₂	NO ₂	H ₂ O	HCl	SO ₂
F1	0,20750	7,435.10 ⁻⁴	9,917.10 ⁻⁴	0,0843	0,6567	0,02380	0,02540	3,965.10 ⁻⁴	9,91.10 ⁻⁵
F2	0,20745	7,432.10 ⁻⁴	9,916.10 ⁻⁴	0,08429	0,6565	0,02375	0,02535	3,964.10 ⁻⁴	9,90.10 ⁻⁵
F3	0,20748	7,433.10 ⁻⁴	9,918.10 ⁻⁴	0,08428	0,6566	0,02378	0,02538	3,966.10 ⁻⁴	9,93.10 ⁻⁵

F4	0,20749	7,430.10 ⁻⁴	9,919.10 ⁻⁴	0,08431	0,6564	0,02376	0,02541	3,965.10 ⁻⁴	9,91.10 ⁻⁵
F5	0,20744	7,436.10 ⁻⁴	9,916.10 ⁻⁴	0,08430	0,6563	0,02377	0,02538	3,963.10 ⁻⁴	9,92.10 ⁻⁵

3. RÉSULTATS

3.1. Rendement et perte du filtre granulaire granite

Le rendement du filtre granulaire est le taux de nanoparticules de fumée déposée sur les parois des granulats de granite dans le filtre. Nous avons relevé tous les points auxquels la vitesse des particules de fumée est complètement nulle. Pour chaque type de filtre, il est donné par l'équation (5) [2].

$$\eta_f = 100 \frac{v_{dm}}{v_i} \quad (5)$$

Où v_i est la fraction volumique initiale de particule i et v_{dm} est la fraction volumique moyenne de cette même particule retenue par le filtre. La perte est le taux de fumée restituée et sortie du filtre. Elle est calculée par l'équation (6).

$$\tau_p = 100 \left(1 - \frac{v_{dm}}{v_i} \right) \quad (6)$$

Le tableau 6 nous montre le rendement de cinq catégories des filtres granulaires de granite étudiés. On observe que les filtres F1, F2, F3 et F4 sont plus efficaces pour retenir les CO₂, NO₂ et H₂O. Les filtres F2, F3 et F4 sont plus actifs pour fixer les CO. En revanche, les filtres F1, F2 et F3 attrapent seulement les C de suies, O₂ et NO₂. Les filtres F1, F3 et F4 maintiennent les HCl et SO₂. Parce que les H₂O retenues se condensent et favorisent le dépôt de toutes les autres nanoparticules. En plus, ces quatre premiers filtres renferment d'immense lit de granulats de petite taille. D'autant plus, leurs porosités et leurs perméabilités sont faibles. Par contre, leurs tortuosités sont élevées. Par conséquent, les nanoparticules de fumée dont la vitesse est lente sont bien confinées. L'adhésion, la collision et le colmatage aux parois des grains sont prometteuses pour le dépôt.

En général, les quatre premiers filtres sont bien efficaces pour arrêter définitivement les aérosols de fumée par rapport au filtre F5 dont le rendement maximal n'est que 11,20 %. Puisque toutes caractéristiques sont différentes à celles des filtres F1, F2, F3 et F4 telles que la porosité, la perméabilité et la tortuosité ainsi que la taille des grains obstacles. La dispersion des nanoparticules de fumée dans ce dernier filtre est dominante et réduit l'adhésion, la collision et le colmatage de ces aérosols aux parois de granulats capteurs. Sa porosité élevée favorise le relargage et la sortie de fumée.

Tableau 6 : Rendement (%) du filtre granulaire en basalte ou granite de fumée

Particules de fumée	Filtre I	Filtre II	Filtre III	Filtre IV	Filtre V
CO ₂	55,13	63,08	50,17	51,90	10,80
CO	46,87	58,05	65,50	56,63	10,73
C	52,43	58,11	59,00	45,24	10,75
O ₂	53,62	57,06	59,91	45,79	10,91
N ₂	63,39	58,18	63,19	48,27	10,99
NO ₂	63,03	63,03	65,55	50,00	11,76
H ₂ O	85,04	78,74	66,14	50,00	11,81
HCl	90,79	45,80	73,53	57,83	11,78
SO ₂	80,38	49,64	82,03	57,34	11,25
FUMEE	62,96	59,08	65,00	51,45	11,20

Le rendement et la perte du filtre granulaire de fumée sont ainsi représentés par les figures 4 et 5. La figure 4 montre l'efficacité du filtre. En moyenne, les filtres F1, F2 et F3 ont de rendement plus de 60 %. Car les porosités de ces filtres sont faibles, plutôt inférieure à 20 %.

En plus, ils ont de lit de grains volumineux favorisant la capture des nanoparticules de fumée. De l'autre côté, pour les filtres F4 et F5, la porosité devient plus en plus grande. Les nanoparticules de fumée peuvent disperser. C'est pourquoi les rendements moyens de ces deux derniers filtres décroissent.

La figure 5 représente le taux de fumée échappée du filtre. Ce taux constitue la perte qui est faible quand la porosité est aussi faible. Dans le cas contraire, elle augmente parce que la perméabilité du filtre est élevée

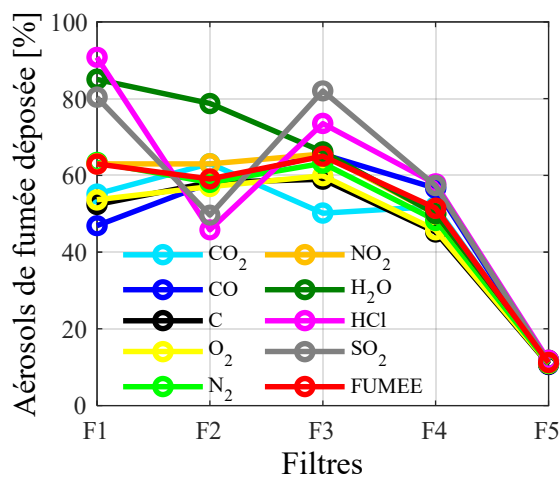


Figure 4 : Taux de fumée arrêtée par le filtre

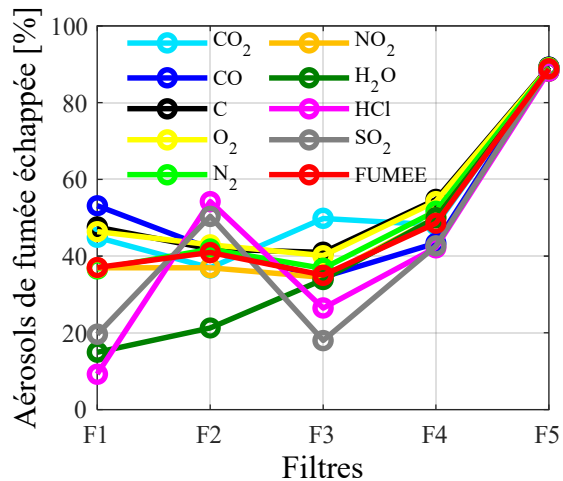


Figure 5 : Taux de fumée échappée du filtre

4. MODÉLISATION DU RENDEMENT DES FILTRES PAR LE RÉSEAU DE NEURONES ARTIFICIELS

4.1. Introduction

Ce présent paragraphe a pour but d'exprimer le rendement et la perte des filtres granulaires en granite en fonction de tous les paramètres d'entrée de simulation. Dans ce cas, nous allons utiliser le réseau de neurones artificiels. Les données utilisées sont les données des simulations numériques sous le code Fluent pour obtenir un modèle exploitable.

4.2. Entrées et sortie

Les entrées de ce système sont la vitesse, la température et les fractions volumiques initiales des nanoparticules de fumée. L'arête des grains, la porosité, la largeur des pores, la température et la rugosité des parois sont aussi des entrées de cette modélisation. Les sorties sont le rendement et la perte des filtres.

4.3. Interpolation des entrées

Nous avons appris l'étape d'interpolation des données des entrées pour que le modèle obtenu soit bon et que l'architecture du réseau de neurones artificiels soit simple. La méthode d'interpolation à moindre erreur utilisée est la moyenne mobile d'ordre 2 à douze fois de reprises [19]. Elle est définie par l'équation (7).

$$\overline{X}_i = \frac{X_i + X_{i+1}}{2} \quad (7)$$

Où X_i et $\overline{X}_i$ sont respectivement la valeur et la moyenne mobile de l'entrée i.

4.4. Standardisation des entrées

En principe, les entrées doivent être standardisées par l'équation (8) [20] pour être homogène

$$x_i = \frac{X_i - \bar{X}}{\sigma} \quad (8)$$

Où σ est l'écart – type d'une variable d'entrée i . Les données calculées par l'équation (8) sont des données de bases à utiliser dans l'apprentissage de notre modèle.

4.5. Répartition des données

La répartition de nos 16 385 données issues de l'équation (7) est représentée dans le tableau 7.

Tableau 7 : Répartition des données

Apprentissage	70 %	11 469
Test	15 %	2 458
Validation	15 %	2 458
Total	100 %	16 385

4.6. Résultats du modèle

4.6.1. Architecture neuronale

L'architecture du réseau de neurones traitant nos données est représentée par la figure 6. Les entrées sont notées par x_i . Les sorties sont désignées par Y_i . Pour les entrées, si $i = \{1, 2, \dots, 9\}$, les x_i sont associées aux fractions volumiques initiales des particules ; si $i = \{10, 11, 12\}$, les x_i sont attribuées à la vitesse et température initiales de fumée puis à la température initiale des parois ; si $i = \{13, 14, 15, 16\}$, les x_i sont réservées pour l'arête des grains, la largeur des pores, la hauteur de rugosité et la porosité de filtre.

Pour les sorties, si $i = \{1, 2, \dots, 10\}$, Y_i représentent les rendements. Si $i = 11$, Y_i est assimilée à la perte du filtre. Au total, notre modèle a 16 entrées et 11 sorties. La figure 6 représente l'architecture neuronale de notre modèle.

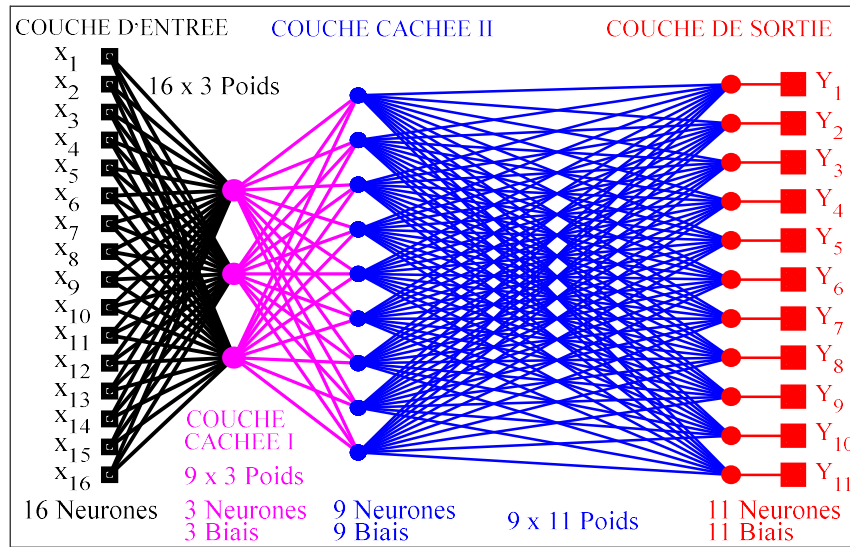


Figure 6 : Architecture neuronale du modèle

4.6.2. Performance et validation du modèle

Nous avons fait entraîner notre modèle 50 fois de suite. Puis, nous avons déterminé les erreurs quadratiques moyennes (MSE), les racines carrées de ces erreurs (RMSE) et l'histogramme de ces erreurs ainsi que la corrélation du rendement observé et du rendement prédit. La MSE et la RMSE sont calculées en appliquant la formule (9) [21] et la formule (10) [22].

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\eta_o - \eta_p)^2 \quad (9)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\eta_o - \eta_p)^2} \quad (10)$$

Où η_o et η_p sont respectivement les rendements donnés par la simulation et les rendements prédits par le réseau de neurones artificiels.

Les résultats des entraînements sont exposés par la figure 7. Dans les figures 7.1 et 7.2, MSEM est la MSE minimale qui vaut $4,69.10^{-6} \%$ à 49^e itération. RMSEM est la RMSE minimale égale à $2,16625.10^{-3} \%$.

La figure 7.3 montre l'histogramme des erreurs. Les instances des erreurs sur l'axe des ordonnées présentent le nombre d'erreurs et sur les bandes indiquent le pourcentage des erreurs de chaque bande. La courbe en rouge représente la distribution des erreurs. Autour de 0, elle a une forme de clochette à bande large. Son intervalle de confiance est $[-0,0033 ; 0,0033]$ et englobe 99 % des erreurs.

La figure 7.4 illustre la corrélation et la superposition du rendement observé et du rendement calculé. Le coefficient de leur corrélation est égal 0,9999.

Ainsi, les résultats de ces quatre critères confirment la validation et la bonne performance de notre modèle neuronal. Nous avons eu un modèle numérique optimal de réseau de neurones artificiels.

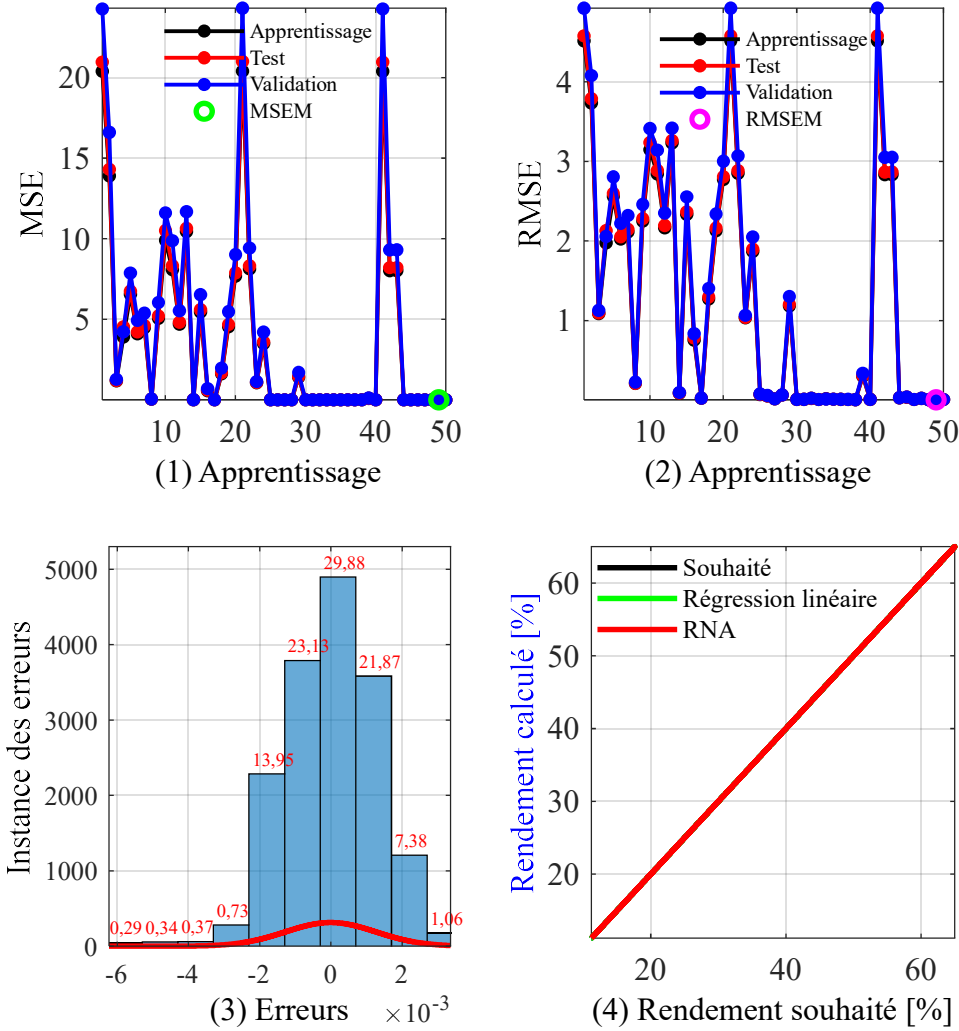


Figure 7 : Performance du modèle

4.6.3. Courbe du modèle numérique

Les rendements et les pertes des filtres donnés par le modèle numérique optimal sont représentés par les figures 8 et 9. Le couple des entrées contient seize paramètres qui sont la vitesse (U_0), la température (T_a), les fractions volumiques initiales (v_i) des nanoparticules de fumée, l'arête (a) des grains, la porosité (ϕ), la largeur des pores (l_p), la température (T_0) et la rugosité (h) des parois. Les sorties sont le rendement (η) et la perte (τ_p) des filtres. Les relations qui relient les entrées et les sorties sont régies par l'équation (11) pour le rendement et par l'équation (12) pour la perte.

$$\eta = f(U_0, T_a, v_i, \phi, l_p, T_0, h, a) \quad (11)$$

$$\tau_p = 1 - f(U_0, T_a, v_i, \phi, l_p, T_0, h, a) \quad (12)$$

Les figures 8 et 9 exposent le rendement et la perte calculés par notre modèle.

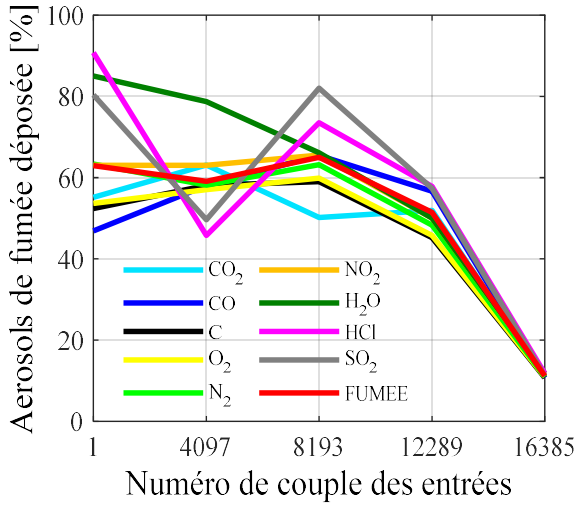


Figure 8 : Rendement calculé par le modèle

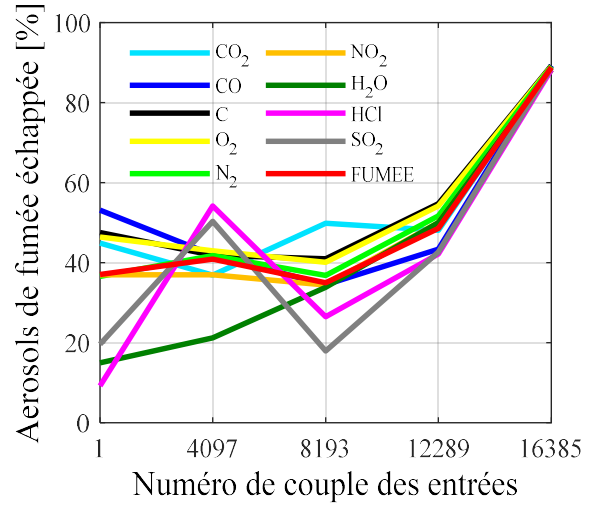


Figure 9 : Perte calculée par le modèle

4.6.4. Équation du modèle

La sortie de chaque couche cachée est définie par l'équation (13) [23].

$$s_j = f_j \left(\sum_{i=1}^n \omega_{i,j} x_i + \omega_{oj} \right) \quad (13)$$

Avec $\omega_{i,j}$ et ω_{oj} sont respectivement le poids synaptique et le biais au $i^{ème}$ neurone de $j^{ème}$ couche et f_j est la fonction d'activation.

Pour notre cas, le processus de calcul suit la figure 7. La sortie de chaque couche cachée est donnée par l'équations (14). Alors que la sortie finale est exprimée par l'équation (15).

$$s_j = th \left(\sum_{i=1}^n \omega_{i,j} x_i + \omega_{oj} \right) \quad (14)$$

$$y_s = \omega_k s_3 + \omega_{ok} \quad (15)$$

Où $j = \{1, 2\}$ est pour les deux couches cachées et $j = 3$ pour la couche de sortie. $n = 16$ pour un neurone dans la couche cachée I ; $n = 3$ pour un neurone dans la couche cachée II et $n = 9$ pour un neurone dans la couche de sortie. Le ω_k est le poids synaptique à l'entrée de $k^{ème}$ neurone de la couche de sortie. Les ω_{oj} et ω_{ok} sont des biais de neurones de ces trois dernières couches. Enfin, le rendement et la perte sont exprimés par les équations (16) et (17).

$$\eta = \omega_k s_3 + \omega_{ok} \quad (16)$$

$$\tau_p = 1 - (\omega_k s_3 + \omega_{ok}) \quad (17)$$

D'autre manière, le rendement déstandardisé est donné par l'équation (18) où y_s^* : la sortie standard, $\bar{\varepsilon}$: écart moyen, $\sigma(Y_i)$: écart – type et $\bar{X}(Y_i)$: moyenne arithmétique de sortie observée. Le taux de fumée sortie est aussi exprimé par l'équation (19).

$$\eta = \sigma(Y_i) y_s^* + \bar{X}(Y_i) \pm \bar{\varepsilon} \quad (18)$$

$$\tau_p = 1 - \left[\sigma(Y_i) y_s^* + \bar{X}(Y_i) \pm \bar{\varepsilon} \right] \quad (19)$$

Les rendements et les pertes des filtres granulaires en granite de fumée après la simulation et la modélisation par la moyenne mobile d'ordre 2 et par le réseau de neurones artificiels sont illustrés par la figure 10 où les courbes des résultats obtenus sont bien superposées. Cela confirme que les résultats de ces trois méthodes sont pareils, corrélés et ressemblent.

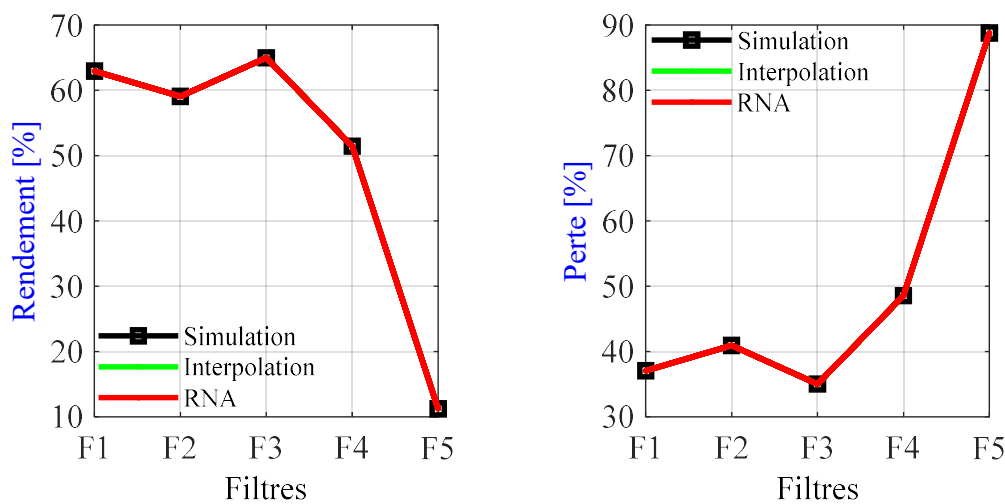


Figure 10 : Courbes finales de rendement et de perte de la simulation et de la modélisation

5. DISCUSSION

Dans ce paragraphe, nous avons mis en valeurs et validé les résultats de notre recherche. Nous avons situé ces résultats à l'échelle de vérité et de fiabilité. En parlant des méthodes, nous avons des résultats complètement identiques après la simulation numérique et la modélisation par la moyenne mobile d'ordre 2 pour l'interpolation et par le réseau de neurones artificiels.

Nos résultats sont aussi comparables à ceux de Hailong PANG sur l'étude du dépoussiérage électrostatique [2]. En plus, les rendements des filtres granulaires que nous avons trouvés sont proche des rendements de filtre céramique de fumée étudié par Jong In Choi et al. [5]. Encore, le moindre écart des résultats a lieu entre les nôtres et ceux de A. BENKENIDA [1] sur l'électrofiltre.

6. CONCLUSION

Dans ce travail, nous avons simulé numériquement le fonctionnement de cinq catégories de filtres granulaires en granite de fumée d'une centrale thermique. Les rendements moyens trouvés sont 62,96 % ; 59,08 % ; 65 % ; 51,45 % et 11,20 % pour respectivement les filtres F1, F2, F3, F4 et F5 de porosité 10 %, 15 %, 20 %, 25 % et 30 %. La taille, en millimètre, de grains utilisés dans chaque filtre mesure 10, 20, 30, 40 et 50. Ces filtres mesurent 0,5 m de longueur puis 0,2 m de largeur et de hauteur. Nous avons modélisé les efficacités de ces filtres en fonction de vitesse, température, des fractions volumiques initiales des nanoparticules de fumée puis l'arête des grains, la porosité, la largeur des pores, la température ainsi que la rugosité de parois des grains des filtres par la méthode du réseau de neurones artificiels. Les résultats du modèle obtenu sont identiques à ceux des simulations.

REFERENCES

- [1] A. BENKENIDA, *Dimensionnement de l'usine d'incinération des déchets ménagers avec récupération d'énergie*, Juillet 1995.
- [2] Benkrama Khedidja et Laouri Nadia Achouak, *Étude d'un électro filtre fil – cylindre pour le traitement de fumée industrielle*, Université d'Ain Témouchent – BELHADJ Bouchaïb – Algérie, 2020.
- [3] Mohamed Amine TALBI et Oualid MAHAN, *Dimensionnement d'un filtre à manches de dépoussiérage à voie sèche pour un silo de forme cylindrique*, 2017.
- [4] Jong In Choi et al., *Catalytic Filter Technology for Simultaneous Removal of NO_x and Particulates*. Journal of Hazardous Materials, 2005.
- [5] F. Benkhaldoun, *Méthode des volumes finis*, LAGA Université Paris 13, 2010.
- [6] Bear, J., *Dynamics of Fluids in Porous Media*, Dover Publications, 1972.
- [7] Nield & Bejan, *Convection in Porous Media*, 5th ed., Springer, 2017.
- [8] Gidaspow, *Multiphase Flow and Fluidization*, Academic Press, 1994.
- [9] Hinds, *Aerosol Technology*, Wiley, 1999.
- [10] MARCO PILOTTI, *Transport in Porous Media : Generation of Realistic Porous Media by Grains Sedimentation*, Dipartimento di Ingegneria Civile, Università degli Studi di Brescia, 38, Via Branze, 25123, Brescia, Italy, May 1998.
- [11] Guy Dallaire, *Les granulats*, Ing Complexe Scientifique 2700, rue Einstein SAINTE-FOY (Québec).
- [12] Judith SAUSSE, *Caractérisation et modélisation des écoulements fluides en milieu fissuré. Relation avec les altérations hydrothermales et quantification des paléo – contraintes*, Université Henri Poincaré, Nancy 1, 1998.
- [13] RAKOTONDRAIBE Tony Lala Manuelltito, *Contribution à l'exploitation industrielle du granit en carreaux : cas de la Société GraniMar*, ESP Université d'Antananarivo, Décembre 2023.
- [14] A. Dassargues, *Introduction à la géothermie et principes théoriques sur le transfert et le stockage de chaleur dans le sous-sol*, LIEGE Université, Sciences Appliquées, Belgique, 2018.
- [15] Michel LAURENT et Pierre – Louis VUILLERMOZ, *Conductivité thermique des solides*, Institut National des Sciences Appliquées (INSA) de Lyon.
- [16] Winkler, E. M., *Stone in Architecture : Properties, Durability*, Springer – Verlag, 1997.
- [17] Ahmed Benamar et al., *Contribution du transport de particules en suspension à l'érosion interne des sols*. Migration de particules en milieu poreux, Université du Havre, 2006.
- [18] Alain Quartier – la – Tente, *Les Moyennes Mobiles et la qualité de la décomposition*. Lemna, Insee, Université de Nantes.
- [19] HARY Jean, *Prévision de la sécheresse dans la région ouest de Madagascar par différentes méthodes*, Thèse, Université d'Antananarivo, 2017.
- [20] Christian Jutten, *Réseaux de neurones formels*, Master Recherches Scientifiques Cognitives. Lab. des Images et des Signaux (LIS), UMR 5083 Centre National de la Recherche Scientifique, Institut National Polytechnique de Grenoble, Université de Joseph Fourier, Grenoble, 2005.
- [21] Timothy O. Hodson, *Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE) : when to use them or not*, U.S. Geological Survey Central Midwest Water Science Center, Urbana, IL, 2022.
- [22] BOURENANE Aomar, *Générateur intelligent de multi – réseaux neuronaux artificiels*, Master, Ecole Nationale Polytechnique d'Algérie, 2018.