

Étude De Déplacement Des Granulats De Formes Et Tailles Variées Sur Une Conduite Inclivée Immersée A L'aide Du Système Neuro-Flou

[Displacement Of Aggregates Of Various Shapes And Sizes On An Immersed Inclined Pipe Using The Neuro-Fuzzy System]

Randrianarison Hervais Dieu Donné¹, Razafimandimby Honoré², Lalaoharisoa Sahoby¹, Adolphe Andriamanga Ratiarison¹

¹Laboratoire Dynamique de l'Atmosphère, du Climat et des Océans (DyACO), Sciences et Technologies, Université d'Antananarivo Madagascar

²Domaine de Sciences et Technologies, Université de Toliara Madagascar



Résumé-- Cette étude s'intéresse à l'écoulement dans un liquide des granulats par la méthode d'élément discret (DEM). L'objectif est la modélisation de la vitesse moyenne de translation des granulats de différentes formes et de tailles dans des écoulements de différentes viscosités du liquide d'immersion. Nous avons fait des simulations avec le logiciel ROCKY DEM par la méthode d'élément discret (DEM). Les paramètres principaux sont la forme des granulats, la taille et la viscosité du fluide. Les écoulements se font sur une conduite inclinée. La loi de comportement est celle de Newton.

Le système d'inférence neuro-flou adaptatif (ANFIS) a été utilisé pour l'analyse des résultats obtenus afin de réaliser la modélisation.

Le but ultime de ce travail est de décrire numériquement les caractéristiques des écoulements selon la forme et la taille des matériaux granulaires et la viscosité du liquide d'immersion en appliquant des simulations sur ordinateur. Il a été déterminé alors que les données expérimentales peuvent être estimées dans une mesure particulièrement proche via le modèle ANFIS.

Mots-clés--Écoulement, DEM, granulats, matériaux granulaires, nombre de sommets, viscosité, vitesse, ANFIS.

Abstract- This work focuses on the flow of aggregates in a liquid using the Discrete Element Method (DEM). The objective is to model the translational velocity of aggregates of various shapes and sizes in flows with different viscosities of the immersion liquid. Simulations were performed using the ROCKY DEM software with the Discrete Element Method (DEM). The main parameters are the shape of the aggregates, size, and fluid viscosity. The flows occur in an inclined pipe, and the behavior follows Newton's law. The Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS) was used to analyze the results obtained to achieve the modeling.

The ultimate goal of this work is to numerically describe the flow characteristics based on the shape and size of granular materials and the viscosity of the immersion liquid by applying computer simulations. It was determined that experimental data can be estimated with a particularly high degree of accuracy using the ANFIS model.

Keywords- Flow, DEM, aggregate, granular materials, number of vertices, viscosity, velocity, ANFIS.

1. INTRODUCTION

Les granulats ou matériaux granulaires sont constitués d'un ensemble de particules de matière solide provenant des roches, des sols ou des matériaux brisés. Les granulats sont des substances granulaires formées d'un ensemble d'éléments solides de dimensions généralement comprises entre 1 et 100 mm. Ils sont obtenus par concassage, criblage etc. ... et sont utilisés dans la fabrication de différents matériaux de construction et dans les différentes couches de chaussées. Leurs écoulements sur une conduite inclinée se présentent sur plusieurs domaines industriels.[1], [2], [3], [4], [5].

Les formes des grains ont des effets sur le comportement mécanique du matériau granulaire. À l'intérieur d'un agrégat de grains, le comportement de l'agrégat correspond à des effets mutuels entre les grains. Pour cela on utilise la méthode des éléments discrets pour étudier efficacement les contacts, la séparation et le déplacement par frottement entre les grains. Des éléments de forme angulaire ont été adoptés pour représenter plus correctement l'influence de la forme du grain.

Dans cette étude, nous avons utilisé la méthode des éléments discrets pour l'analyse mécanique des mouvements des écoulements.[6],[7]. L'objectif est de déterminer le comportement des granulats immergés dans l'écoulement sur une piste inclinée (Figure 1). Ce comportement est essentiellement la vitesse linéaire de déplacement de ces matériaux.

Dans la partie modélisation, le système neuro-flou ANFIS (adaptive neuro-fuzzy inference system) est utilisé.

2. MÉTHODOLOGIES : étude dynamique et cinématique des écoulements granulaires

Des simulations sont effectuées à l'aide du logiciel « Rocky DEM » pour étudier les écoulements de granulats immergés dans un liquide sur une conduite inclinée.

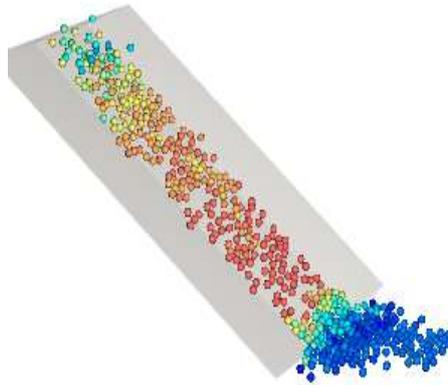


Figure 1 : Illustration de la simulation : dispositif expérimental (l'écoulement du fluide n'est pas présenté)

Les équations régissant l'écoulement

Lors de l'écoulement, chaque granulat subit des mouvements de translations et de rotations en trois dimensions (3D) (Figure 2).

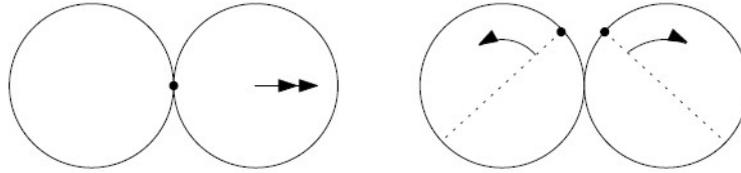


Figure 2 : Translation et rotation entre deux granulats en une dimension

Pour visualiser et prédire les comportements des granulats dans l'écoulement à trois dimensions (3D), nous appliquons la méthode des éléments discrets (DEM) sur les lois de Newton. Chaque particule « i » a 6 degrés de liberté : 3 translations et 3 rotations.

Les mouvements de translations sont régis par l'équation suivante :

$$m_i \frac{d\vec{V}_i}{dt} = \sum_{j \neq i} \vec{F}_{ij} + \vec{F}_{surface} + \vec{F}_{hydro} + m_i \vec{g} \quad (1)$$

Où F_{ij} est la force de contact exercée par la particule j sur la particule i , $F_{surface}$ représente la force exercée par paroi ou mur sur la particule i , g est la gravité et F_{hydro} sont les forces hydrodynamiques associées à la présence d'un fluide appliquées à la particule i (poussée d'Archimède, traînée, portance...).

Nous écrivons également la loi d'évolution pour la contribution rotationnelle ω_i issue de la seconde loi de Newton :

$$J_{\Delta i} \frac{d\omega_i}{dt} = \sum_{j \neq i} M_{ij} + M_{surface} + M_{hydro} \quad (2)$$

Où M_{ij} est le moment de force exercé par la particule j sur la particule i et M_{hydro} est le moment du couple exercé par le fluide sur la particule i . Notons que le poids n'a pas de contribution pour le couple, de même que la poussée d'Archimède. $J_{\Delta i}$ est le moment d'inertie de la particule i . La force extérieure F_{hydro} ainsi que le moment M_{hydro} associé sont déterminés par l'interaction entre l'écoulement de fluide et la particule.

Ces équations permettent de connaître en détail la structure interne de l'écoulement c'est-à-dire pour chaque solide en mouvement.

a. Intégration des équations de Newton : méthode de saute-mouton, algorithme de Verlet [5][8]

Pour intégrer les équations du mouvement de Newton ci-dessus, nous utilisons l'algorithme de Verlet : calculer pas à pas les trajectoires des grains. Plus précisément, nous suivons l'étape de « saute-mouton ».

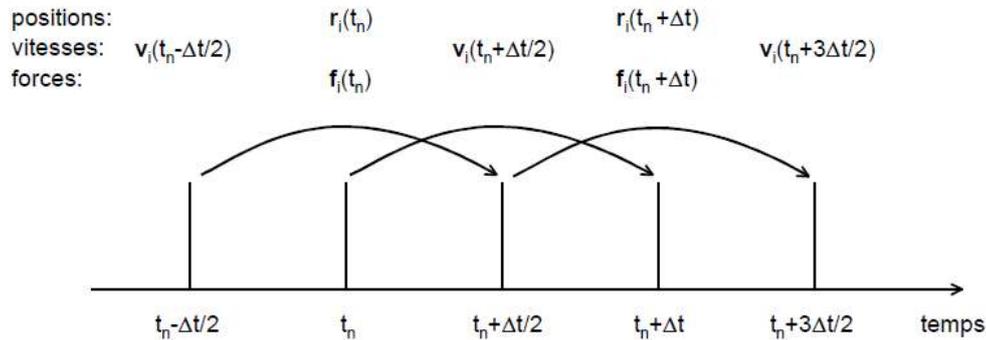


Figure 3 : Intégrations des équations de mouvement suivant l’algorithme de saute-mouton

b. Résumé de l’algorithme :

En connaissant les positions, les vitesses, les accélérations, les forces de contact à l’instant $(t-\Delta t)$ et en connaissant les vitesses à l’instant $(t-\frac{\Delta t}{2})$, nous pouvons calculer les positions, les vitesses de chaque élément à l’instant t et les forces de contact à cet instant par mise à jour en cas de contact et nous déduisons enfin les accélérations à l’instant t .

Nous calculons ensuite les vitesses à l’instant $(t+\frac{\Delta t}{2})$ et la résolution est continuée pas à pas jusqu’à la durée de simulation souhaitée.

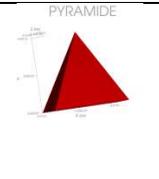
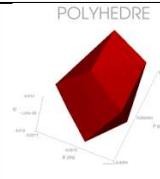
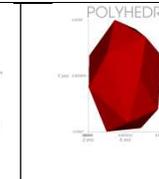
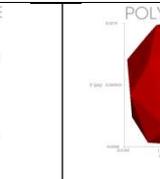
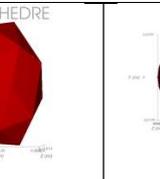
3. MATÉRIEL : Logiciel ROCKY DEM

Nous utilisons le logiciel ROCKY DEM pour analyser les mouvements de chaque granulat en modélisant les forces de contact entre chaque particule voisine.

3.1. Granulats

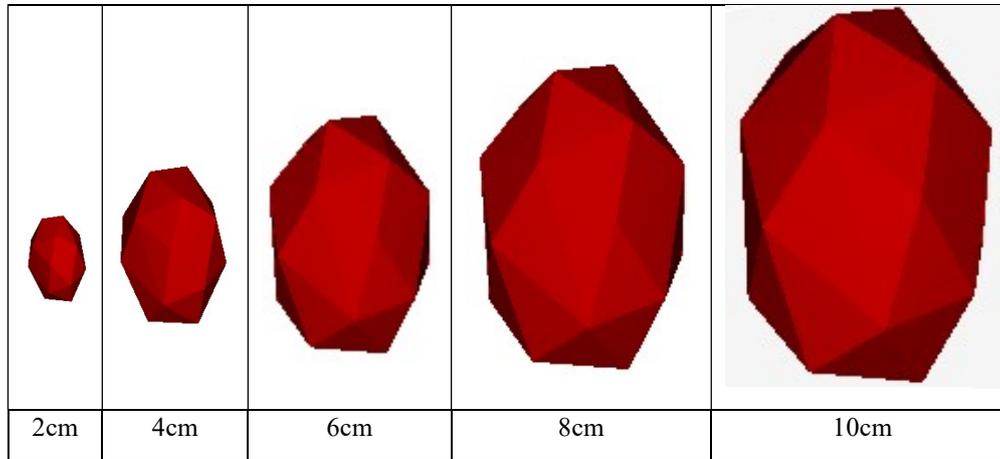
Les matériaux granulaires indéformables utilisés dans notre étude sont des quartz de masse volumique 2660 Kg/m^3 . La taille des granulats simulés est variée de 0.02 à 0.1m. Le tableau 1 nous donne les types de granulat puis le tableau 2 nous renseigne les tailles choisies pour la simulation.

Tableau 1 : Type de granulats

				
5 sommets	10 sommets	15 sommets	20 sommets	sphérique
Type A	Type B	Type C	Type D	Type E

La figure ci-après donne les tailles des granulats que nous avons simulés, représentées à une échelle 1/2.

Tableau 2 : Taille des granulats utilisée (Échelle : 1/2)



3.2. Étude de l'écoulement sur une pente inclinée

Un débit de granulats sont déposés au sommet du plan incliné avec un faible écoulement de fluide. Ils se déplacent avec le liquide sous l'effet de la gravité g le long de la trajectoire rectiligne de longueur $L=5m$ et inclinée d'un angle de 40° par rapport à l'horizontal. Des essais d'écoulement sont réalisés à chaque type de granulat et à différentes viscosités du fluide. Les différentes viscosités du fluide, exprimées en Pascal. Seconde, sont 0.001, 0.005, 0.01, 0.05, 0.1, 0.5, 1, 5, 10 (en Pa.s). La masse volumique du liquide est fixée à 1000 kg/m^3 . Le nombre des granulats utilisés pendant le temps de simulation varie en fonction du type des granulats.

4. RÉSULTATS : Comparaison des écoulements en fonction de la taille des granulats

Nous allons procéder à la comparaison des vitesses linéaires des granulats en fonction de leur taille, qui varie de 2 à 10 cm. Nous nous concentrons alors sur les écoulements après une durée de 5 secondes. Il est important de noter que l'écoulement se déroule sur une conduite inclinée de 5m de longueur, et incliné de 40° avec l'horizontal, ce qui peut influencer le comportement d'écoulement.

- Axe des abscisses : taille des granulats en centimètres
- Axe des ordonnées : graduation de la vitesse linéaire en m/s
- Couleur des courbes : type des granulats

En examinant les vitesses de translation des granulats pour chaque taille spécifique, nous pouvons mieux comprendre comment la variation de la taille des particules affecte leur vitesse dans l'écoulement.

Pour les trois graphiques suivants, de la figure 4, où la viscosité varie de 0.001 à 0.1 Pa.s, on observe une augmentation de la vitesse de déplacement des granulats en fonction de leur taille. Mais cette augmentation reste relativement modérée.

L'effet de la taille n'a pas une grande importance sur des écoulements des granulats de type A, B, C et D car, à une viscosité, l'aspect de l'écoulement sont similaire.

Nous avons observé des similitudes frappantes dans les vitesses pour les types de granulats B, C et D, spécifiquement dans la plage de tailles allant de 4 à 8 cm. Cependant, il convient de noter que les granulats de forme sphérique, correspondant au type

E, présentent une variabilité significative de vitesses en fonction de leur taille. Notamment, ces granulats sphériques affichent des vitesses considérablement plus élevées en comparaison avec les autres types de granulats.

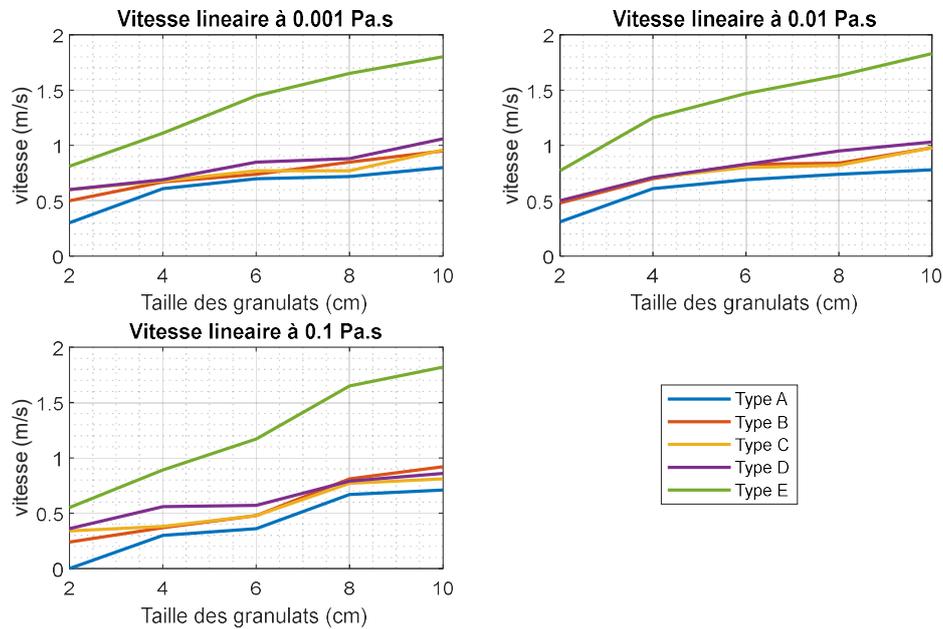


Figure 4 : Vitesse linéaire en fonction de la taille des granulats (0.001Pa.s, 0.01Pa.s, 0.1Pa.s)

Ensuite, pour une viscosité allant de 0.5 à 10 Pa.s, nous avons les courbes de la figure 5 suivantes. L'effet de la viscosité se manifeste à partir de 0.5 Pa.s, les niveaux de la vitesse sont inférieurs à ceux de la figure 4 ci-dessus. Cependant la vitesse continue de s'augmenter avec la taille des granulats. Par ailleurs, il est important de noter que l'effet de la forme joue également un rôle significatif : chaque type de granulat démontre sa propre vitesse caractéristique (figure 5). D'autre part, on constate la difficulté de l'écoulement à partir d'une viscosité de 5 Pa.s pour la plupart des types de granulat.

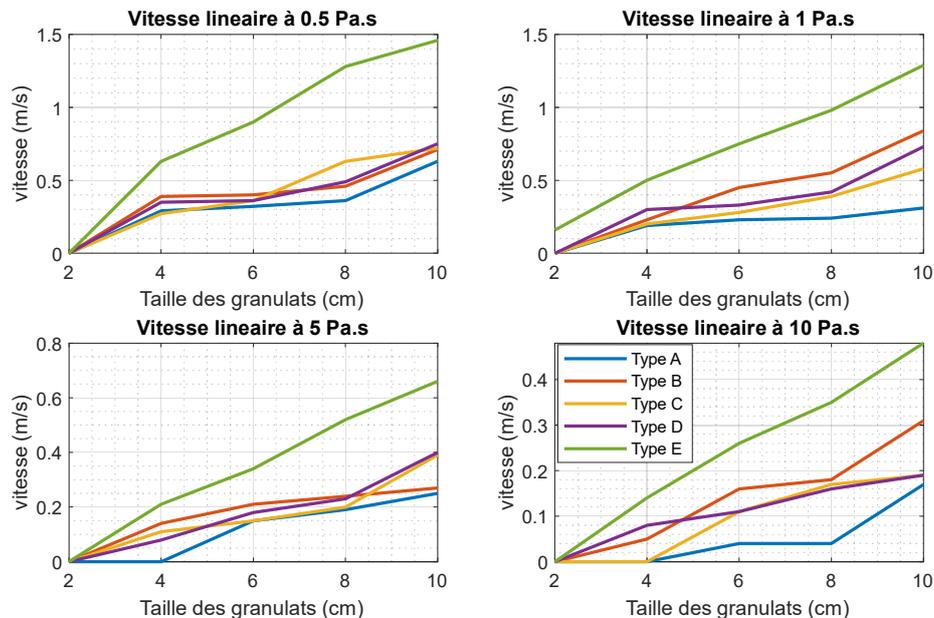


Figure 5 : Vitesse linéaire en fonction de la taille des granulats (0.5Pa.s à 10Pa.s)

5. Discussion

Les résultats de nos simulations mettent en évidence des variations significatives dans les écoulements en fonction de la forme des granulats, déterminée par le nombre de faces ou de sommets, et de leurs tailles.

En observant l'effet de la forme des granulats, le Type A, caractérisé par cinq sommets, présente des conditions d'écoulement particulièrement difficiles. Les Types B, C et D, quant à eux, affichent des écoulements de niveau intermédiaire, tandis que le Type E démontre un écoulement presque fluide.

En ce qui concerne la taille des granulats, variant de 2 à 10 cm, les résultats indiquent que cette caractéristique a un impact limité sur l'écoulement. Les différences observées sont principalement dues à l'effet de la gravité terrestre, favorisant un écoulement plus prononcé pour les matériaux de plus grandes tailles.

Concernant la viscosité du liquide, une valeur autour de 5 Pa.s marque le seuil à partir duquel l'écoulement devient considérablement difficile. Cette observation souligne l'influence significative de la viscosité sur les propriétés d'écoulement des matériaux granulaires, sur toutes les tailles de granulats.

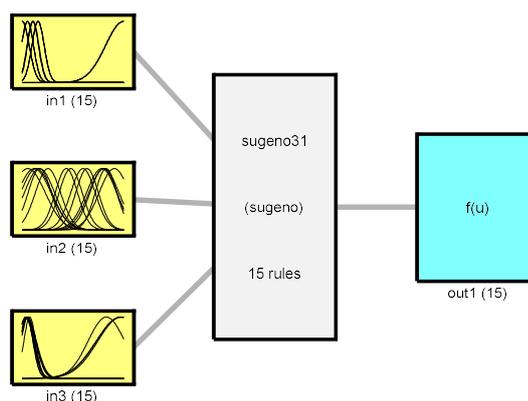
6. Modélisation de la vitesse linéaire

Pour cette partie de l'étude, nous avons collecté un ensemble de 175 simulations ou données pour effectuer la modélisation, dont 75% ont été réservés à l'apprentissage du modèle puis 25% pour le test. Elles ne sont ni prises par groupe, ni prises par ordre, elles sont permutées pour les mélanger, afin d'analyser un par un pour obtenir le bon modèle. Le système ANFIS a été utilisé pour cette modélisation, permettant une analyse plus profonde des relations entre la vitesse linéaire, les autres paramètres de l'écoulement granulaire et surtout la taille des granulats. Ce système a été introduit dans le logiciel MATLAB afin d'établir le modèle

6.1. Caractéristique du système ANFIS appliqué

Le modèle se compose de 15 clusters (groupes), avec une phase d'apprentissage comprenant 200 époques. Les données utilisées pour la modélisation sont organisées en deux ensembles : l'entrée, constituée de trois variables par 175 données (ou nombre de simulation) qui sont la forme des granulats, leurs tailles et la viscosité du liquide d'immersion ; puis la sortie avec une seule variable caractéristique : la vitesse linéaire par 175 données.

Le système est fondé par 15 règles floues dont les deux figures ci-dessous représentent ces caractéristiques. La figure 6 illustre cette architecture. La notation « sugeno31 » veut dire qu'on a utilisé le modèle Sugeno dans la partie logique floue et il y a 3 entrées et une sortie.



System sugeno31: 3 inputs, 1 outputs, 15 rules

Figure 6 : Architecture du système ANFIS utilisé pour la vitesse linéaire

La figure 7 ci-dessous représente les fonctions d'appartenance pour les variables d'entrée du modèle ANFIS pour la modélisation globale de la vitesse linéaire. La fonction gaussienne est utilisée dans cette étape, chaque courbe est numérotée de 1 à 15 c'est-à-dire qu'elles sont subdivisées en 15 intervalles. Pour chaque repère, l'axe des ordonnées représente le degré d'appartenance qui varie de 0 à 1.

- Type de granulats, les valeurs sont comprises entre 5 et 100. Cet intervalle est subdivisé en 15 intervalles pour chaque courbe, mais la plupart des valeurs utilisées sont inférieure à 25 : 5, 10, 15, 20 d'où la concentration des courbes autour de l'abscisse 15.
- La taille varie de 2 à 10 et subdivisée en 15 intervalles
- La viscosité du liquide d'immersion varie de 0 à 10.

Par ces entrées : forme, taille et viscosité, nous avons 15 règles floues, qui sont représentées par la structure suivante (figure 7).

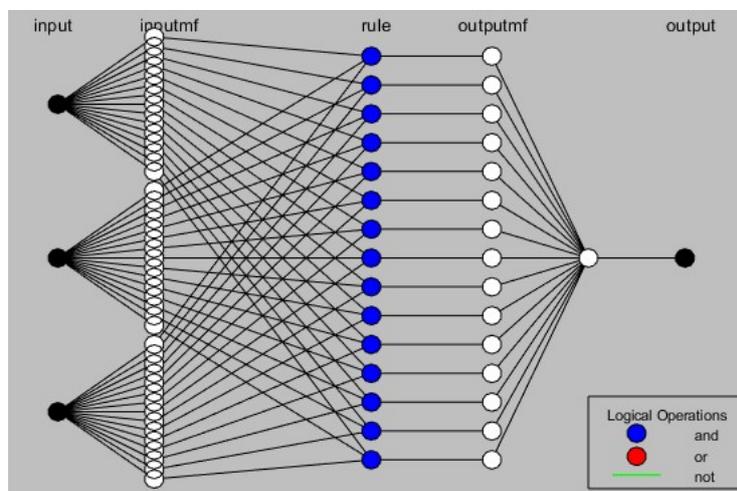


Figure 7 : Structure du réseau dans le système ANFIS utilisé

6.2. Résultats de la modélisation

Dans la première couche du système, la valeur de l'erreur minimale est de 0.3532 lors de l'entraînement de cette couche. Dans la deuxième couche, avec un seul neurone, l'erreur est de 0.22367 lors de son entraînement. Alors, nous avons obtenu les courbes suivantes, elles permettent d'évaluer la qualité du modèle.

La figure 8 « Apprentissage » représente les résultats du modèle sur l'ensemble des données d'entraînement. La courbe en haut montre comment les prédictions du modèle (TrainOutputs) correspondent aux valeurs réelles (TrainTargets) pour les données d'entraînement.

La courbe en noire montre la valeur de la vitesse simulée par le Logiciel Rocky DEM pour chaque simulation. La couleur rouge donne les estimations ou modèles obtenus par le système ANFIS. La comparaison donne une idée de la qualité des prédictions sur l'ensemble d'entraînement. Les deux figures en bas montrent l'erreur (différence entre les cibles et les sorties du modèle) au fil du temps pour les données d'apprentissage avec une distribution des erreurs avec l'histogramme et une courbe de tendance. Concernant ces erreurs, la figure en bas à gauche montre l'évolution des erreurs d'entraînement au fil des époques ou chaque simulation. L'erreur varie de 0 à 0.19 m/s. Nous avons l'histogramme des erreurs d'entraînement (la figure à droite) qui montre des erreurs concentrées autour de zéro.

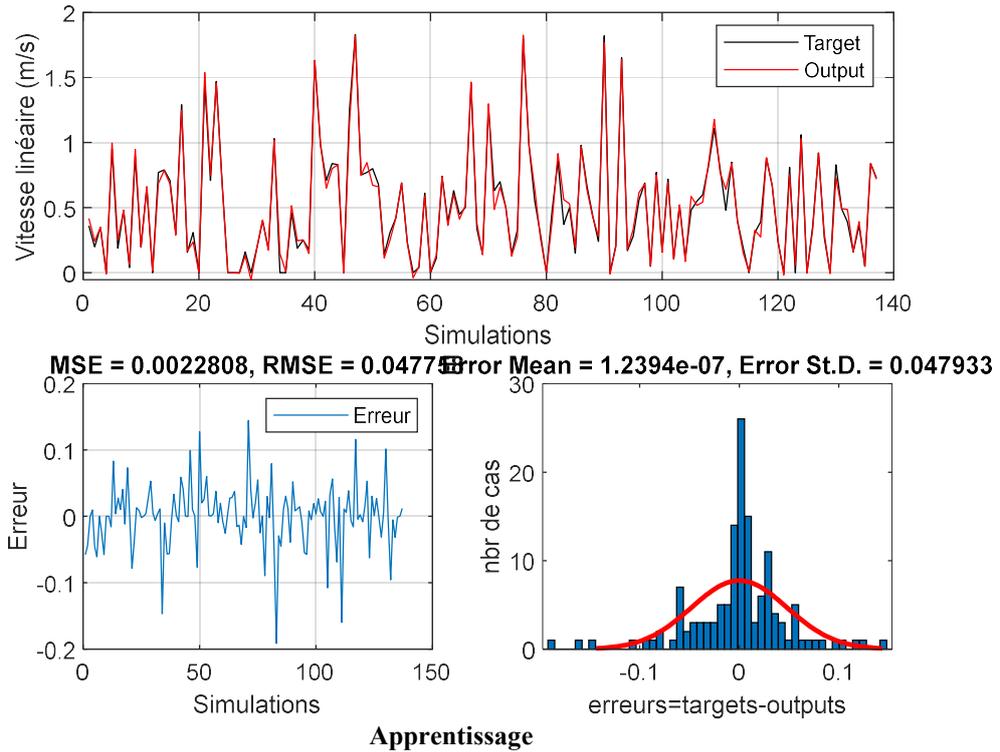


Figure 8 : Entraînement ou apprentissage du modèle ANFIS

La figure 9 « Test » affiche les résultats du modèle sur l'ensemble de test. Ce test permet d'évaluer la capacité du modèle à généraliser sur des données qu'il n'a pas vues pendant l'entraînement. La comparaison entre les prédictions et les valeurs réelles dans cette figure montre de la performance du modèle en dehors de l'ensemble d'entraînement parce que nous avons trouvé des superpositions. On constate que les erreurs sont faibles avec une valeur RMSE de 0.107.

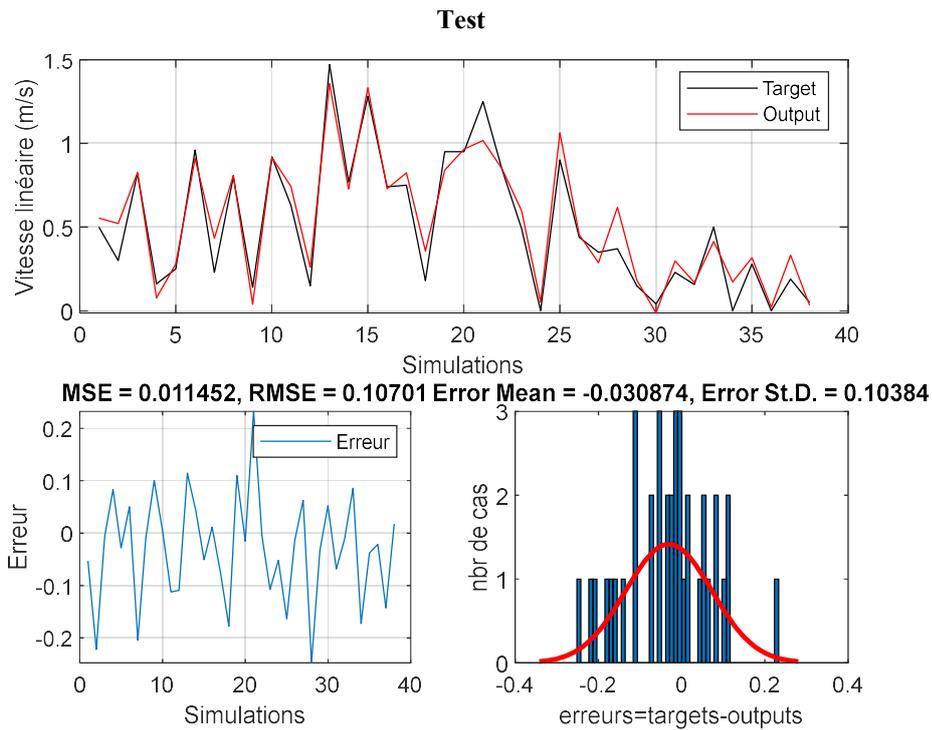


Figure 9 : Représentation du test du modèle obtenu par rapport aux données réelles

Dans la figure 10, nous évaluons la performance du modèle en superposant les deux courbes de la vitesse linéaire : les données de prédictions représentées par la courbe rouge et les valeurs réelles représentées par la courbe noire sur toutes les données. On constate des divergences minimales entre elles : faibles différences entre ces deux courbes. On peut dire que nous avons établi un bon modèle et que les valeurs de MSE et RMSE sont respectivement égales à 0.0048 et 0.069.

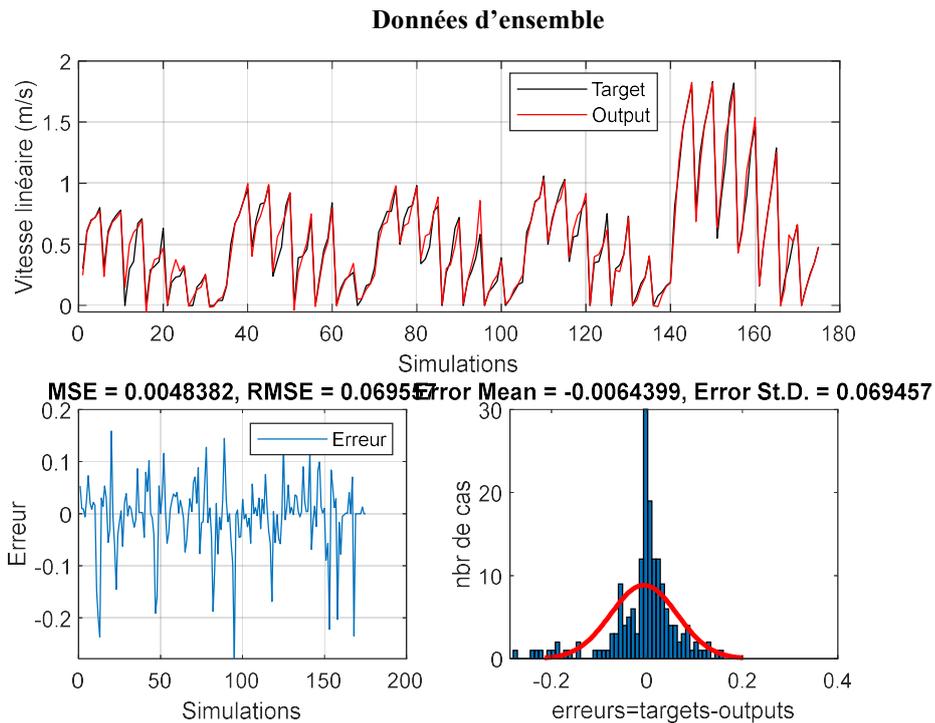


Figure 10 : Ensemble test et modèle par rapport aux données brutes

La figure 11 ci-dessous indique la corrélation entre la sortie du modèle par ANFIS et la sortie des résultats des simulations de la vitesse de translation des granulats. Nous avons constaté une corrélation élevée, c'est-à-dire une concordance significative entre les prédictions du modèle et les résultats des simulations ($R=0.985$). Cela valide l'aptitude du modèle à capturer les tendances et les variations de la vitesse de translation en fonction de la taille des granulats, sa forme et la viscosité du liquide d'immersion. Par conséquent, la concentration des points autour de la ligne de régression, associée à un coefficient de détermination R élevé, nous permet de dire que le modèle de la vitesse linéaire obtenu démontre une bonne performance.

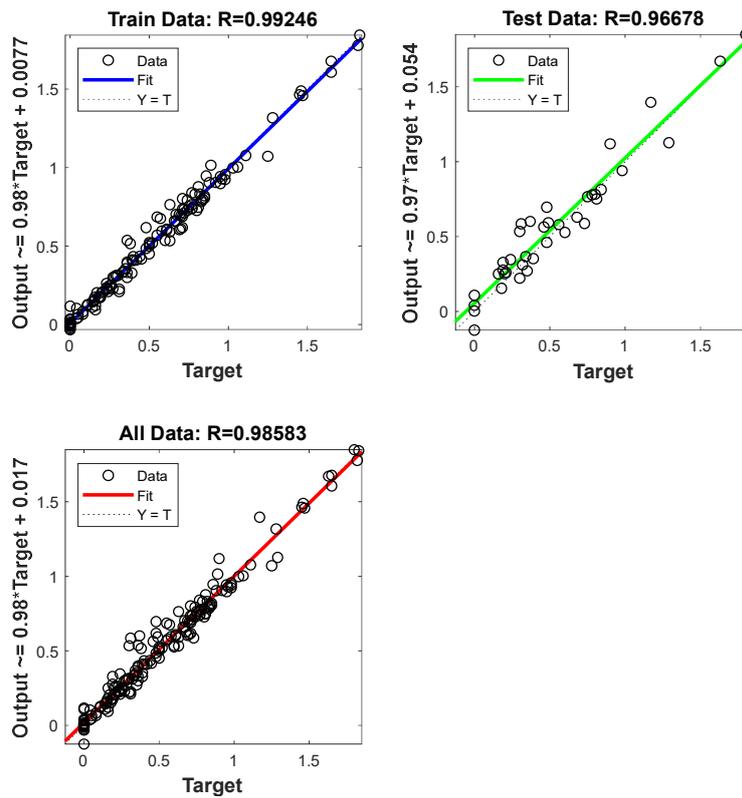


Figure 11 : Corrélation entre la sortie du modèle et la sortie des résultats des simulations de la vitesse de translation

6.3. Utilisation du modèle

La figure 12 ci-dessous expose le résultat final de la modélisation de la vitesse linéaire globale de l'écoulement granulaire réalisée par le système ANFIS. Avec les différentes valeurs des variables d'entrée (in_1 , in_2 , in_3), le modèle donne la valeur de la variable de sortie. À titre d'exemple :

- $in_1 = 15$ (nombre de sommets)
- $in_2 = 6$ (taille des granulats)
- $in_3 = 0.1$ (viscosité)

Cela donne $out_1 = 0.685\text{m/s}$ (vitesse linéaire)

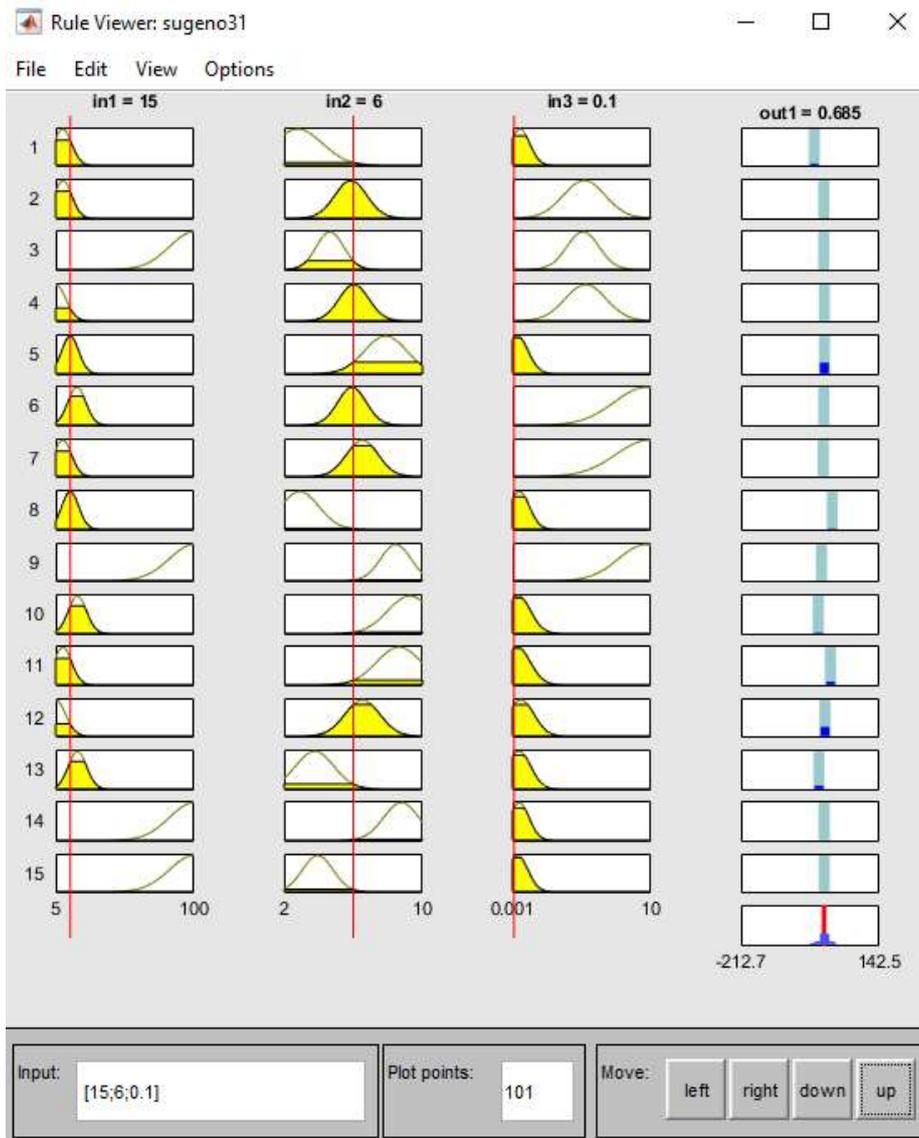


Figure 12 : Résultat de la modélisations de la vitesse linéaire

7. CONCLUSION

Nous avons réalisé des simulations détaillées des écoulements granulaires en nous concentrant particulièrement sur les vitesses de translation des particules. Nos objectifs sont de comprendre les mécanismes fondamentaux régissant les mouvements des granules. Nos résultats ont révélé plusieurs conclusions importantes. Tout d'abord, nous avons observé la variation croissante de la vitesse de translation moyenne des granules avec leurs tailles. De plus, nous avons constaté que la vitesse linéaire des particules n'est pas fortement influencée par la géométrie ou formes des granules. Concernant la viscosité du liquide d'immersion, les figures que nous avons élaborées montrent la difficulté de l'écoulement à partir d'une viscosité de 5 Pa.s pour la plupart des types de granulat.

L'utilisation du système ANFIS pour la modélisation de l'écoulement granulaire (vitesse linéaire) nous permet d'obtenir du modèle fiable et exploitable selon la taille et la forme des granules, et la viscosité du liquide d'immersion.

Références

- [1] P. Mutabaruka, « Modélisation numérique des milieux granulaires immergés : initiation et propagation des avalanches dans un fluide », p. 188.
- [2] J. Bouteloup, « Simulation numérique de la dynamique d'un lit granulaire cisailé par un fluide visqueux », p. 141.
- [3] S. C. D. Pont, « Avalanches granulaires en milieu fluide », p. 139.
- [4] E. Izard, « Modélisation numérique des écoulements granulaires denses immergés dans un fluide », p. 152.
- [5] P.A. Cundall et O. D. L. Strack, « A discrete numerical model for granular assemblies, p47-65
- [6] « DEM Technical Manual » Manuel d'utilisation du logiciel ROCKY DEM par ESSS. 2019
- [7] C. O'Sullivan, « Particulate Discrete Element Modelling », p. 574.
- [8] J. Courant, « Méthodes d'Euler, méthode de Verlet », p. 8, 2016.