



Université du Québec
à Rimouski

**Caractérisation des poudres alimentaires lors de
l'ensachage industriel en vue d'une prédiction des
cadences optimales des équipements**

Mémoire présenté

dans le cadre du programme de maîtrise en ingénierie

en vue de l'obtention du grade de maître ès sciences appliquées (M.Sc.A.)

PAR

© THOMAS BOUSQUET

Août 2019

Composition du jury :

Jean-Sébastien Deschênes, président du jury, Université du Québec à Rimouski

Jean Brousseau, directeur de recherche, Université du Québec à Rimouski

Noureddine Barka, codirecteur de recherche, Université du Québec à Rimouski

Hussein Ibrahim, examinateur externe, Institut Technologique de maintenance industrielle

Dépôt initial le 29/07/2019

Dépôt final le 29/08/2019

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À RIMOUSKI
Service de la bibliothèque

Avertissement

La diffusion de ce mémoire ou de cette thèse se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire « *Autorisation de reproduire et de diffuser un rapport, un mémoire ou une thèse* ». En signant ce formulaire, l'auteur concède à l'Université du Québec à Rimouski une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de son travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, l'auteur autorise l'Université du Québec à Rimouski à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de son travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits moraux ni à ses droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, l'auteur conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont il possède un exemplaire.

REMERCIEMENTS

Le projet de maîtrise a été amené par Premier Tech Ltée, basée à Rivière-du-loup au Québec. Je remercie toute l'équipe de recherche et développement avec laquelle j'ai travaillé pour leur accueil, leur temps et leurs conseils. Plus particulièrement, je remercie Jean-Luc Roy, responsable des halles de tests industriels chez Premier Tech. Son dévouement a permis d'avoir des appareils de mesures fabriqués à l'interne à la hauteur des besoins, ainsi qu'un aménagement très rapide du laboratoire. Je remercie Frédéric Gauvin et Alexis Darisse pour leur supervision et la gestion globale du projet, ainsi que pour la confiance qu'ils m'ont accordée tout au long du projet. Je remercie Guillaume Ladéroute et Étienne Giasson pour leur dévouement, leur aide précieuse et le temps qu'ils m'ont accordé. Sans leur expertise sur la machine étudiée, ce projet n'aurait pas pu aboutir. Je remercie également tous les équipiers qui ont participé aux mesures et m'ont aidé avec les essais parfois plusieurs jours d'affilée en me faisant confiance. Enfin, je remercie chaleureusement mon directeur de maîtrise, Jean Brousseau, qui a su m'aiguiller tout au long de ce projet en me laissant beaucoup d'autonomie, qui m'a fait confiance sur le développement des outils prédictifs et qui a su garder à l'esprit les objectifs principaux tout au long du projet.

AVANT-PROPOS

Ce mémoire est l'aboutissement de 2 années de travail sur le comportement des matériaux en poudre dans le cadre du cheminement en maîtrise en génie mécanique à l'Université du Québec à Rimouski (UQAR). Cette maîtrise est effectuée en double diplomation avec l'école d'ingénieurs des Arts et Métiers (ENSAM).

Le sujet de maîtrise est construit autour d'une problématique soulevée par une entreprise régionale, Premier Tech Chronos, et soumise à l'université dans le cadre d'une entente de partenariat.

RÉSUMÉ

La caractérisation des poudres et la prédiction de leur comportement dans les machines d'ensachage présentent de nombreuses difficultés. Le projet vise à prédire les comportements des poudres lors de l'ensachage à partir de leurs propriétés de base. Une revue de littérature a permis d'identifier les propriétés les plus susceptibles d'avoir un impact sur l'ensachage des poudres. Des appareils de mesures de la rhéologie des poudres sont sélectionnés pour mesurer six propriétés caractéristiques des poudres. De plus, un protocole de mesure a été élaboré afin de récolter des données représentatives du comportement réel des poudres pendant le processus d'ensachage réel. Des analyses des données récoltées montrent le niveau de corrélation entre les propriétés, les impacts de chaque propriété sur les performances à l'ensachage et les différences entre les poudres. Une réduction de la dimension d'étude grâce à l'analyse des composantes principales permet également de représenter toute l'étendue des poudres connues dans un plan. Parmi les différents modèles de prédiction évalués, le modèle d'apprentissage supervisé nommé « k plus proches voisins » donne les meilleurs résultats, bien qu'ils soient encore limités par le nombre trop faible de données disponibles. Les scores de prédictions du modèle montrent qu'il est effectivement possible de prédire l'ensachage des poudres grâce à la mesure des six propriétés utilisées. Les similarités entre les poudres sont utilisées pour nuancer la performance du modèle en comparant l'ensachage des poudres similaires à celle pour laquelle la prédiction a été faite. Bien que la base de données comporte encore un nombre peu élevé de poudres, les résultats de cette étude sont très encourageants pour améliorer la connaissance des poudres et l'adaptation des machines d'ensachage à la spécificité de leur comportement macroscopique.

Mots clés : Poudres, corrélations, rhéologie, apprentissage supervisé, prédiction, ensachage, composantes principales, modèle de comportement.

ABSTRACT

The characterization of powders and the prediction of their behavior in bagging machines present many difficulties. The project aims to predict the behaviors of powders during bagging from their basic properties. Some research in the scientific literature lead to identify the properties most likely to have an impact on the bagging of powders. Some measure devices of powder's rheology are selected to measure six characteristic properties of the powders. Moreover, a measure protocol about the industrial bagger is also set up to gather the measures of the real behavior of the powders during the real bagging process. Some analysis of collected data shows the correlations level between the properties, the impacts of each property on the bagging performances and the differences between powders. A reduction of the study dimension thanks to a principal component analysis allows also to represent all the range of known powders on a plane. Among the different prediction models evaluated, the learning model named "k nearest neighbors" gives the best results, although it is still limited by the too small number of data available. The predictions scores of the model shows that it is possible to predict the bagging of powders from the measure of the six used properties. The similarities between powders are used to nuance the model performance by comparing the bagging of similar powders to the one for which the predictions are made. Although the database contains still a small number of powders, the results of this study are really encouraging to improve the knowledge of powders and the adaptation of the bagging machines to the specificities of their macroscopic behavior.

Keywords: Powders, correlations, rheology, supervised learning, prediction, bagging, principal components, behavior model.

TABLE DES MATIÈRES

Caractérisation des poudres alimentaires lors de l'ensachage industriel en vue d'une prédiction des cadences optimales des équipements	i
REMERCIEMENTS.....	v
AVANT-PROPOS	vi
RÉSUMÉ	vii
ABSTRACT.....	viii
TABLE DES MATIÈRES	ix
LISTE DES TABLEAUX	xiii
LISTE DES FIGURES	xv
LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES.....	xviii
LISTE DES SYMBOLES.....	xix
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
CONTEXTE DU PROJET	1
PROBLÉMATIQUE ABORDÉE	2
OBJECTIFS ET MÉTHODES EMPLOYÉES	2
DIVISION DU CONTENU	6
CHAPITRE 1 Caractérisation des poudres.....	8
1.1 DÉFINITION D'UNE POUDRE.....	8
1.1.1 Revue de littérature	8
1.1.2 Expertise de l'entreprise	9
1.2 MESURES DE CARACTÉRISATION DES POUDRES	10

1.2.1	Mesures de rhéologie.....	10
1.2.2	Détermination des mesures à réaliser	12
1.2.3	Présentation des appareils utilisés	17
1.3	CRÉATION DU LABORATOIRE	30
1.3.1	Préparation des échantillons avant les mesures.....	31
1.3.2	Étude du nombre nécessaire de mesures par appareil	31
1.3.3	Aménagement d'une salle dédiée.....	35
1.4	ÉTUDE LES POUDRES DANS L'ENSACHEUSE INDUSTRIELLE	36
1.4.1	Étude de l'ensacheuse	36
1.4.2	Définition du protocole de tests sur la machine de référence.....	38
1.4.3	Données récoltées : performance de la poudre à l'ensachage	40
1.5	ANALYSE DES CORRÉLATIONS ENTRE LES PROPRIÉTÉS	45
1.6	CONCLUSION	52
CHAPITRE 2 Base de données et analyses		53
2.1	CRÉATION DE LA BASE DE DONNÉES.....	53
2.1.1	Stockage des données	53
2.1.2	Liens entre la base de données et le programme qui les manipule.....	56
2.1.3	Création de la matrice X des poudres.....	58
2.2	OBSERVATION DES INTERVALLES — CONTRAT DE PERFORMANCES.....	60
2.2.1	Création et mise à jour du fichier	60
2.2.2	Observation des caractéristiques	61
2.2.3	Observation des flux.....	65
2.2.4	Utilité industrielle de ces comparaisons	67
2.3	COMPARAISON DES POUDRES ENTRE ELLES	68
2.3.1	Carte d'observation de l'ensemble des poudres	70
2.3.2	Comparaison des poudres par similarités.....	77
2.4	CONCLUSION	87
CHAPITRE 3 Prédiction de l'ensachage grâce aux caractéristiques		88

3.1	OUTILS DE PRÉDICTION DISPONIBLES	89
3.1.1	Notions de base sur les modèles de prédictions numériques	89
3.1.2	Inventaire des principales fonctions de régression	91
3.1.3	Premiers tests de prédiction	96
3.1.4	Inventaire des fonctions de classification	98
3.1.5	Préparation des données avant prédiction.....	99
3.2	CHOIX DE L'OUTIL LE PLUS EFFICACE.....	100
3.2.1	Calcul des erreurs d'apprentissage des erreurs d'ensachage	100
3.2.2	Calcul des erreurs d'apprentissage pour le flux	103
3.2.3	Calcul des erreurs d'apprentissage pour la précision.....	109
3.3	COMPARAISON ENTRE LA PRÉDICTION ET LES POUDRES SIMILAIRES.....	113
3.3.1	Processus de prédiction final	113
3.3.2	Comparaison de la prédiction par rapport à la réalité	118
3.3.3	Utilisation des prédictions pour construire une recette.....	120
3.4	SCORES DE PRÉDICTIONS ET ÉVOLUTIVITÉ DE L'APPRENTISSAGE	124
3.4.1	Scores de prédiction pour chaque poudre	125
3.4.2	Évolution du programme de prédiction	128
3.4.3	Impact du nombre de paramètres caractéristiques définissant la poudre.....	130
3.4.4	Comparaison avec un modèle linéaire constitué des composantes principales de l'analyse PCA	134
3.5	CONCLUSION.....	137
	CONCLUSION GÉNÉRALE.....	139
	RAPPEL DU CONTEXTE.....	139
	RAPPEL DES ACTIONS MENÉES ET DES MÉTHODES APPLIQUÉES.....	139
	RÉSULTATS OBTENUS	141
	RÉPONSE GLOBALE À LA PROBLÉMATIQUE	144
	RECOMMANDATIONS	145
	ANNEXES.....	148

ANNEXE I : PROTOCOLES DE MESURES DES PROPRIÉTÉS CARACTÉRISTIQUES.....	148
ANNEXE II : TABLEAU DES FONCTIONS DE TABLEUR UTILISÉES	162
ANNEXE III : TABLEAU RÉCAPITULATIF DES FONCTIONS ET MODULES PYTHON UTILISÉS	163
ANNEXE IV : ÉTAPES PRINCIPALES DE L'ANALYSE D'UNE POUDRE INCONNUE	164
ANNEXE V : GRAPHIQUES D'OBSERVATION DE LA PRÉCISION ET DES ERREURS D'ENSACHAGES POUR UNE CONFIGURATION SÉLECTIONNÉE, POUR CHAQUE PROPRIÉTÉ DES POUDRES	165
ANNEXE VI : INTERFACE GRAPHIQUE ASSOCIÉE	167
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	172

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Définitions des propriétés mesurables sur les poudres	12
Tableau 2 : Résumé des propriétés mesurables sur les poudres	14
Tableau 3 : Comparaison des caractéristiques de ces 2 poudres	29
Tableau 4 : Utilisation de chaque appareil de mesure	32
Tableau 5 : Correspondance entre la lettre et la hauteur en mm de l'ouverture d'ensachage.....	38
Tableau 6 : Caractérisation complète d'une poudre – Feuille de mesures manuscrites	40
Tableau 7 : Indicateurs de performances de l'ensachage : flux, précision et erreurs	44
Tableau 8 : Corrélations entre les six propriétés des poudres.....	47
Tableau 9 : Corrélations des paramètres machines de l'ensachage	49
Tableau 10 : Corrélations de l'ensachage avec les propriétés des poudres	50
Tableau 11 : Décomposition en composantes principales	73
Tableau 12 : Propriétés de la poudre inconnue utilisée	75
Tableau 13 : Récapitulatif des modèles d'apprentissage supervisé disponibles.....	94
Tableau 14 : Récapitulatif des fonctions de classification disponibles.	98
Tableau 15 : Comparaison des prédictions des classes d'erreurs pour différents modèles	102
Tableau 16 : Résumé des coefficients de régression pour les modèles de régression	104
Tableau 17 : Résumé des pourcentages de prédictions correctes	125

Tableau 18 : Récapitulatif des scores de prédiction selon le nombre de paramètres 131

Tableau 19 : Récapitulatif des scores de prédiction selon le nombre de facteurs
principaux pour un modèle linéaire..... 135

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Schéma des sollicitations subies par une poudre lors de son ensachage.....	16
Figure 2 : Appareil de mesure de l'angle de repos	19
Figure 3 : Schéma de mesure de l'angle (gauche) et Appareil de mesure réelle (droite)	20
Figure 4 : Appareil de mesure de la densité compactée	22
Figure 5 : Appareil de la mesure de la densité compactée d'une poudre	23
Figure 6 : Appareil de mesure de la densité en vrac d'une poudre.....	24
Figure 7 : Photo illustrant l'obtention d'une surface plane pour un volume précis.....	25
Figure 8 : Appareil de mesure de l'aération d'une poudre (avant et arrière).....	26
Figure 9 : Schéma de l'appareil d'aération et des mesures effectuées grâce à lui.....	27
Figure 10 : Aération d'une poudre de soya (gauche) et d'une farine de blé (droite).....	29
Figure 11 : Schéma de la machine de remplissage par le bas, de sa vis et de son ouverture	37
Figure 12 : Schéma de la construction du tableau des données résumées par poudre.....	55
Figure 13 : Processus de manipulation des données par le tableur puis l'application.....	56
Figure 14 : Schéma de la structure du tableau des données après manipulations	58
Figure 15 : Structure des tableaux et des graphiques d'observation des poudres.....	61
Figure 16 : Graphiques d'observation croisée des caractéristiques des poudres	63
Figure 17 : Graphiques d'observation du flux en fonction des caractéristiques.....	65

Figure 18 : Processus nécessaire à l'étude d'une poudre inconnue grâce à l'application	69
Figure 19 : Graphique de la répartition des poudres connues dans leur plan de variance	74
Figure 20 : Processus d'analyse de la carte de répartition des poudres connues	76
Figure 21 : Affichage des 6 poudres similaires pour les 6 propriétés et de la poudre similaire en moyenne ainsi que leurs pourcentages de similitudes	79
Figure 22 : Fenêtre de l'application montrant les poudres similaires à la poudre étudiée	81
Figure 23 : Diagramme des possibilités d'interprétations des similarités	86
Figure 24 : Organigramme déclinant le processus de la validation croisée	95
Figure 25 : Graphiques de comparaison des flux prédits par les 5 modèles et du réel	105
Figure 26 : Comparaison des flux prédits par deux modèles, pour la même poudre	107
Figure 27 : Graphiques de comparaison des précisions prédites par les modèles	109
Figure 28 : Graphiques des précisions prédites par le modèle KPPV	111
Figure 29 : Algorithme du processus de prédiction final dans l'application	115
Figure 30 : Graphiques du flux prédit pour toutes les vitesses à 0,1 Rps près	116
Figure 31 : Structure du tableau récapitulatif de toutes les prédictions	117
Figure 32 : Combinaison des graphiques de comparaison des prédictions	119
Figure 33 : Capture d'écran de la feuille du calcul de la séquence d'ensachage	122
Figure 34 : Organigramme du processus de calcul des scores de prédiction (%)	124
Figure 35 : Processus de calcul de l'évolution du programme au fil du remplissage	128
Figure 36 : Graphique de l'évolution des 3 prédictions en fonction du nombre de poudres connues	129

Figure 37 : Comparaison des graphiques de l'évolution du programme selon le nombre de paramètres définissant les poudres.....	133
Figure 38 : Comparaison des graphiques de l'évolution du programme selon le nombre de paramètres définissant les poudres.....	136
Figure 39 : Fenêtre d'accueil de l'application lors de son lancement	168
Figure 40 : Fenêtre de saisie manuscrite des mesures brutes de la poudre à étudier.....	170

LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES

- RPS** Rotations par seconde. Unité de mesure de la rotation d'un objet.
- PCA** Analyse des composantes principales. Permet de réduire la dimension d'un ensemble de données et provient de l'anglais « Principal Component Analysis ».
- KPPV** K plus proches voisins. Modèle de prédiction par apprentissage supervisé utilisé pour la classification ou la régression.
- VBA** Visual Basic for Applications (VBA). C'est un langage implémenté de Microsoft Visual Basic qui est intégrée dans les outils de la suite bureautique Microsoft Office et permet de créer des macros.
- AdR** Abréviation de l'Angle de Repos, propriété caractéristique du comportement macroscopique d'une poudre.

LISTE DES SYMBOLES

A	Angle mesuré du tas de poudre.
Angle_{moyen}	Moyenne des angles mesurés. Appelé aussi angle de repos.
S_{angle}	Ecart-type des 9 angles mesurés sur le tas de poudre.
D_{tassée}	Densité tassée ou compactée de la poudre.
M	Masse de la poudre.
V_{tassé}	Volume tassé ou compacté de la poudre.
H_r	Ratio de Hausner.
BER	Coefficient d'aération de la poudre (Bed Expansion Ratio en anglais).
V_{aéré}	Volume après aération dans le dispositif de mesure de l'aération.
V_{vrac}	Volume avant aération dans le dispositif de mesure de l'aération.
D_{érée}	Densité aérée de la poudre.
D_{vrac}	Densité en vrac de la poudre.
H_{aérée}	Hauteur de la poudre après aération dans le dispositif de mesure.
H_{vrac}	Hauteur de la poudre avant aération dans le dispositif de mesure.
O	Ouverture du système de remplissage de l'ensacheuse.
V	Vitesse de rotation de la vis de remplissage de l'ensacheuse.
N	Nombre de poudres dans la base de données.

xx

X	Matrice caractéristique de la rhéologie de la poudre.
X_n	Vecteur ligne de la matrice X contenant des propriétés normalisées.
X_{in}	Propriété caractéristique normalisée d'une poudre.
Y	Matrice de la performance de la poudre à l'ensachage.
E%	Ecart en pourcentage entre deux poudres, selon un paramètre donné.
S%	Similarité en pourcentage entre deux poudres, selon un paramètre donné.
λ	Valeur propre d'une matrice.
V_λ	Vecteur propre d'une matrice, associé à la valeur propre λ.
V	Matrice regroupant les vecteurs propres.
PC	Composantes principales, qui sont les vecteurs propres de la matrice de covariance de la matrice des propriétés des poudres.
S	Matrice de covariance des propriétés de la poudre.
Z	Matrice des propriétés de la poudre, écrite dans la base des vecteurs principaux (PC).
v	Variance du domaine associée à une composante principale.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

CONTEXTE DU PROJET

L'ensachage est indispensable pour transporter les matériaux en vrac, notamment les poudres, et c'est pour cela que des dispositifs d'ensachage ont été mis en place par les industriels. Ces machines sont conçues principalement grâce à l'expérience des équipes qui travaillent dans le domaine et nécessitent des tests grandeur nature avec beaucoup de produits car les poudres sont des matériaux dont le comportement n'a pas été formalisé de manière mathématique. Depuis plusieurs dizaines d'années, Premier Tech Chronos imagine et optimise des solutions d'ensachage de matériaux en vrac et notamment des poudres. Or cela nécessite une multitude d'essais préliminaires pour pouvoir dimensionner les machines, et encore des essais lors de son installation et de son optimisation chez le client. En effet lors du processus de vente, Premier Tech Chronos doit garantir une cadence de production aux clients qui désirent faire l'acquisition d'un équipement d'ensachage. Pour ce faire, les clients potentiels envoient habituellement un échantillon de produit en vrac pour des fins d'évaluation. L'équipe d'ingénierie de Premier Tech Chronos réalise alors une analyse qualitative du produit ou entreprend des tests à grandes échelles en faisant fonctionner un équipement d'ensachage avec le produit à évaluer. La première méthode est rapide, mais n'est pas suffisamment précise et rigoureuse alors que la deuxième est précise, mais requiert beaucoup de temps et de travail. De plus, il n'est pas toujours possible d'avoir accès à un équipement d'ensachage pour réaliser les tests. Il y a donc un réel besoin de trouver une méthode d'analyse alternative. Actuellement, c'est l'expertise accumulée depuis plusieurs années qui permet de mettre au point des machines industrielles efficaces et précises, combinée avec de multiples essais sur des échantillons de grande taille (125 kg pour chaque poudre). Toutefois, Premier Tech ne dispose pas d'outil de prédiction du comportement à

l'ensachage à partir de propriétés facilement mesurables. Cette situation justifie la conduite du présent projet de recherche.

PROBLÉMATIQUE ABORDÉE

Si un outil de prédiction du comportement à l'ensachage existait, il pourrait être possible de remplacer ces essais très longs par des mesures simples et rapides qui permettraient, grâce à un programme informatique, de prédire le comportement des produits dans l'ensacheur.

Dans le monde physique, les matériaux sont étudiés sous 3 principaux états de la matière : solide, liquide ou gaz. Néanmoins d'autres états de la matière existent et sont beaucoup moins étudiés, on peut citer par exemple l'état supercritique et l'état granulaire. Si l'état supercritique est atteint pour des températures et pressions très hautes, les matériaux granulaires eux sont largement présents dans le monde à l'état naturel (sable, farine, graviers, céréales, ...) et posent souvent des difficultés quant à leur manipulation. Spécifiquement les matériaux en poudre peuvent se compacter, s'aérer, s'humidifier ou faire de la poussière et tous ces comportements rendent leur ensachage très difficile, un réel défi si l'on veut atteindre des cadences rapides adaptées à la production de masse. Le défi de ce projet est donc de sélectionner les propriétés permettant de caractériser les poudres afin de relier ces propriétés aux performances d'ensachage qui sont la vitesse de remplissage et sa précision. Dans le projet on se demande donc s'il est possible de prédire la performance d'une ensacheuse à partir de la mesure des propriétés des poudres, et comment y parvenir à faible coût et de manière évolutive, c'est-à-dire en faisant des prédictions qui deviendront meilleures avec le temps ?

OBJECTIFS ET MÉTHODES EMPLOYÉES

Les objectifs principaux de cette étude sont les suivants :

1. Définir les caractéristiques qui permettent de définir une poudre de manière simple et rapide.
2. Se procurer les appareils de mesures correspondants et étudier les propriétés des poudres mesurées pour en extraire les plus importantes.
3. Créer une base de données adaptative pour stocker toutes les mesures sur les poudres et alimenter les analyses.
4. Comparer les poudres entre elles grâce à ces propriétés pour identifier leurs ressemblances.
5. Mettre en place un modèle de prédiction du comportement des poudres lors de l'ensachage à partir des propriétés des poudres.
6. Utiliser ces prédictions pour prévoir les recettes à appliquer sur la machine pour optimiser au maximum l'ensachage.

Cette liste montre que le but final de ce projet est de prédire les performances d'une machine d'ensachage type à partir des propriétés de base d'une poudre, et cela va nécessiter la validation des 5 premiers objectifs mentionnés. En d'autres termes, le projet permettra de dégager les principales caractéristiques des poudres étudiées et de les mesurer de manière reproductible, précise et fiable, avant de prédire leur aptitude à être ensachées dans des conditions réelles du procédé. Grâce à une étude des méthodes employée par la communauté scientifique pour mesurer les poudres via une revue de littérature, et en regroupant les informations de l'expertise de l'entreprise, les propriétés les plus importantes à mesurer sont choisies pour valider le premier objectif. Ce choix s'est également basé sur l'étude du fonctionnement et du comportement de la machine d'ensachage. Les propriétés des poudres seront mesurées pour des sollicitations similaires à celles subies dans la machine. Ce choix se base sur l'utilité réelle de chaque paramètre selon les publications qui seront étudiées dans le premier chapitre, tout en tenant compte de la facilité du paramètre à être mesuré et du coût des appareils nécessaires. Il s'agit alors d'acquérir les appareils nécessaires à la

caractérisation et d'étudier leur fonctionnement pour permettre de mesurer correctement les poudres. Une étude en profondeur du fonctionnement et du comportement de la machine d'ensachage (banc d'essai) est ensuite réalisée. Grâce à l'expertise de l'entreprise, les mesures de performances de la poudre à l'ensachage sont définies et un protocole d'essai détaillé est élaboré. D'un côté nous mesurons les propriétés de base des poudres et de l'autre nous déterminons le comportement de la poudre dans une machine d'ensachage. Pour établir le lien entre les deux, nous effectuons en premier lieu une analyse des corrélations sur l'ensemble des mesures réalisées. Cette analyse va montrer les propriétés qui ont le plus d'impact sur les performances d'ensachage et permettra de trier les propriétés et de sélectionner les plus pertinentes pour clore le deuxième objectif.

Le troisième objectif demande de créer une base de données dans le but de saisir, de stocker et de manipuler les données. Lors de sa définition, nous avons pris en considération que la base de données se devait de pouvoir évoluer en fonction des besoins futurs de l'entreprise, être simple et être réalisée à moindre coût.

Les données récoltées doivent être analysées et utilisées afin de d'élaborer des moyens pour prédire les performances de la machine d'ensachage. Dans un premier temps, le quatrième objectif est un outil de comparaison des poudres entre elles. Cela va permettre de comparer les produits via leurs propriétés caractéristiques uniquement, et surtout de pouvoir comparer une poudre inconnue par rapport à toutes les autres disponibles dans la base de données et ainsi se faire une idée du comportement de la nouvelle poudre dans la machine d'ensachage. Cette comparaison est possible grâce à des techniques très simples de manipulation des données : une réduction de la dimension d'étude ou un simple calcul de distance après normalisation des propriétés. Cette approche permet de faire une première comparaison et appréciation du comportement d'une nouvelle poudre. Un peu comme le font actuellement les ingénieurs responsables du développement des machines d'ensachage en se basant sur leur expérience et en tenant compte des caractéristiques observables par les sens, la comparaison basée sur les propriétés mesurées des poudres permet d'identifier celles qui sont les plus ressemblantes, celles pour lesquelles des machines ont été développées et livrées

à des clients. Toutefois, la méthode basée sur la comparaison systématique proposée ne laisse pas de place au jugement ou à l'arbitraire. En effet la comparaison telle qu'elle est conçue utilise des mesures plus précises, des indicateurs plus robustes et tient compte de toutes les données disponibles. La méthode est robuste et permettra d'avoir une bonne idée du comportement d'une nouvelle poudre dans la machine de référence. Cet outil de comparaison permettra d'avoir une base de référence pour juger du modèle de prédiction qui est également développé dans cette étude.

Enfin, il s'agira d'utiliser la base de données contenant toutes les mesures pour élaborer un modèle de prédiction de l'ensachage des poudres ce qui constitue le cinquième objectif. Le modèle de prédiction est une fonction de régression qui reproduit globalement le comportement des poudres de la base de données. Cette fonction peut ensuite être utilisée comme fonction prédictive. Pour le choix de ce modèle, plusieurs possibilités ont été considérées et deux familles de modèles sont essayés : les polynômes avec régularisation pour éviter le sur-apprentissage et les réseaux de neurones. Ils sont comparés afin de sélectionner le plus performant et le plus adapté aux données pour fournir la prédiction la plus fiable possible. Ces modèles entrent dans la catégorie des modèles par apprentissage supervisé, et après plusieurs recherches des outils disponibles, le langage de programmation choisi est Python. Ce langage est choisi car il dispose de tous les outils nécessaires à cette étude via ses nombreuses bibliothèques, notamment celles qui permettent une utilisation simple des outils d'apprentissage supervisés. Les modèles comparés sont plusieurs modèles polynomiaux avec des coefficients supplémentaires (régularisation) pour tenir compte de la vitesse d'apprentissage ainsi que deux modèles non polynomiaux : des arbres de décisions et un modèle de prédiction selon les similarités entre les poudres. Pour choisir l'outil le plus performant, les erreurs sur l'ensemble d'apprentissage (les poudres utilisées par le modèle pour se calibrer) seront étudiées, ainsi que les écarts pour des poudres inconnues. Le modèle le plus performant est celui qui est capable de reconnaître parfaitement une poudre déjà présente dans la base de données et capable de prédire correctement une poudre complètement inconnue. Les prédictions obtenues sont donc étudiées pour les deux configurations (poudre connue et inconnue) ce qui permet de calculer les scores de

performances du modèle de prédiction. Cette étape permettra donc de valider l'efficacité de la prédiction et surtout sa justesse. Enfin, l'apprentissage du programme sera vérifié : les scores d'apprentissage sont calculés au fur et à mesure du remplissage de la base de données pour observer sa courbe d'apprentissage en fonction du nombre de poudres connues.

DIVISION DU CONTENU

La structure de ce mémoire va suivre celle de la méthodologie qui vient d'être présentée. Le premier chapitre traite de la caractérisation des poudres pour satisfaire les deux premiers objectifs de l'étude. Dans ce chapitre la revue de littérature permettra de mettre en avant les propriétés des poudres qui seront utilisées. Ce chapitre présentera également les appareils de mesure qui seront utilisés pour caractériser les poudres, ainsi que la machine d'ensachage sur laquelle repose l'étude. Enfin, une première analyse sera effectuée pour trier les propriétés mesurées.

Le deuxième chapitre de ce mémoire présentera la création de la base de données et la manipulation des données récoltées pour comparer les poudres entre elles, ce qui répondra aux objectifs numéros trois et quatre. La base de données sera présentée et son fonctionnement sera expliqué pour permettre de comprendre le transfert des données vers le programme. Le programme d'analyses et de prédictions sera également expliqué en détails pour permettre au lecteur de comprendre les analyses comparatives qui seront effectuées.

Le troisième et dernier chapitre s'articule autour des deux derniers objectifs et de la vérification des prédictions qui seront effectuées. Les données seront utilisées pour entraîner des modèles numériques de prédiction. Les différentes possibilités de prédictions seront améliorées et comparées pour obtenir le modèle le plus performant, ce qui permettra également de déterminer leur fiabilité. Les prédictions seront alors utilisées pour prédire l'ensachage global d'une poudre inconnue en simulant la recette complète de la machine d'ensachage.

Enfin, une conclusion générale permettra de répondre de manière complète à la problématique générale et de valider la réussite du projet et de l'étude. Elle sera suivie par une section de recommandations pour une étude future ou un approfondissement de cette étude.

CHAPITRE 1

CARACTÉRISATION DES POUDRES

1.1 DÉFINITION D'UNE POUDRE

Les poudres sont des matériaux très particuliers, qui n'entrent pas dans la classification classique des 3 états principaux de la matière. Ce sont des matériaux constitués d'un amas de solides divisés, c'est-à-dire de particules fines d'un ou plusieurs composés. Selon la sollicitation à laquelle le matériau est soumis, il pourra se comporter comme un solide un liquide ou un gaz, ce qui complique beaucoup sa manipulation ainsi que sa définition, qui peut varier selon l'utilisation qui est faite du matériau.

1.1.1 Revue de littérature

Le domaine de l'étude des poudres a commencé de manière approfondie en 1994 avec le premier livre d'E. Guyon et collab. [1] qui retrace l'état des recherches dans ce domaine. Beaucoup de chercheurs se sont également penchés sur la définition d'un tas de granulés très fins comme la poudre. Par exemple S.F. Edwards et son étude minutieuse de leur rhéologie [2] ou K. Saleh pour son travail sur la coulabilité des poudres [4, 5]. Aussi, J. Scher en 2006 dans son article publié dans les Techniques de l'ingénieur [3] décrit de manière complète et précise une poudre alimentaire. Boschini étudie également ces matériaux, mais à l'échelle microscopique [6], ce que l'on peut relier avec certaines études récentes cherchant à modéliser et simuler numériquement le comportement d'un tas de poudre via la définition des interactions inter particules. À propos de ces simulations mathématiques, ce domaine fait l'objet de recherches poussées [7-9], mais ces simulations ne sont pas assez robustes et

nécessitent une extrême complexité en termes de puissance et de temps de calcul des ordinateurs.

Les études récentes se sont plutôt tournées vers une approche plus macroscopique des matériaux granulaires où ce ne sont plus les particules elles-mêmes qui sont étudiées, mais le corps macroscopique formé par le tas. E. Guyon a alors publié un livre en 2017 intitulé « Matière en grains » [10] où il fait un nouvel état de l'art de ce domaine de la physique en se consacrant cette fois beaucoup plus au tas en lui-même qu'aux particules qui le composent. Cette nouvelle échelle d'étude est ainsi beaucoup plus adaptée à l'industrie puisque les essais sont plus simples et plus rapides à mettre en place. En cherchant parmi les fournisseurs d'équipements de laboratoires, on note la présence sur le marché de plusieurs appareils de laboratoire permettant de mesurer certaines des propriétés macroscopiques des poudres avec une bonne rapidité et une très bonne reproductibilité. Des études approfondies des différentes caractéristiques mesurables sur une poudre [11-13, 23] utilisent des méthodes comparables à celle utilisée dans le présent projet de recherche.

La recension de la documentation scientifique ne fait mention d'aucun lien entre toutes ces propriétés mesurées et le procédé d'ensachage industriel, c'est-à-dire l'utilisation industrielle lors de la mise en sacs du comportement des poudres. Dans ce cas, l'originalité du projet de recherche réside dans le développement d'une approche scientifique et quantitative fiable pour garantir l'optimisation des opérations d'ensachage des poudres

1.1.2 Expertise de l'entreprise

Chez Premier Tech Chronos, la filiale de Premier Tech Itée qui conçoit et fabrique notamment des équipements d'ensachage de matériaux en poudre, une poudre est un matériau granulaire dont les grains sont assez fins pour être difficilement percevables au toucher. Eventuellement les matériaux granulaires un peu plus gros mais poussiéreux sont aussi

qualifiés de poudres. Cette définition qualitative peut se traduire par des matériaux contenant des grains au maximum de 1mm de diamètre.

La définition d'une poudre par une entreprise industrielle est donc basée principalement sur le ressenti de ses ingénieurs par rapport à la manipulation du produit. Ainsi, plusieurs ensacheurs sont disponibles dans leur catalogue et permettent de manipuler des poudres plus ou moins poussiéreuses, plus ou moins rapidement selon les besoins et le budget du client. Celui qui sera l'objet de cette étude est un ensacheur qui dépose la poudre au fond du sac pour éviter les dégagements de poussière, son fonctionnement sera expliqué plus précisément par la suite.

Actuellement chez Premier Tech la seule caractéristique utilisée pour comparer les poudres est la densité en vrac. Or cette caractéristique n'est pas mesurée en suivant les prescriptions de la norme ISO 787/11 associée à cette propriété. Pour cette raison, les mesures faites par l'entreprise sont sujettes à des variations importantes. Néanmoins cette mesure permet d'avoir une idée du comportement de la poudre, tout particulièrement par rapport à la taille du sac à utiliser. En plus de la densité en vrac, les poudres peuvent aussi être caractérisées de manière qualitative comme "collantes", "poussiéreuses", "sèches" par exemples. Ces qualificatifs sont subjectifs et sont effectués en comparaison aux poudres connues par l'entreprise mais permettent d'en effectuer une première en les observant pendant leur ensachage ou au toucher.

1.2 MESURES DE CARACTÉRISATION DES POUDRES

1.2.1 Mesures de rhéologie

Maintenant qu'il a été montré que les poudres peuvent être caractérisées par leur rhéologie et que des appareils existent il s'agit de définir précisément ces caractéristiques et savoir s'il est possible de trouver un lien entre les caractéristiques des poudres et leur

propriété à l'ensachage industriel. Des sujets similaires ont été abordés et ont permis d'obtenir des résultats très intéressants quant à la mesure de la coulabilité des poudres, comme il est possible de le voir dans les publications qui seront citées dans ce paragraphe. La forme des particules est un paramètre fondamental pour le mouvement du tas et grâce à des analyses d'images et à des essais de compacité des poudres, il est possible de caractériser de manière qualitative si les poudres concernées vont être facilement manipulables dans le cas de l'industrie pharmaceutique [11]. Cette approche est très intéressante et ouvre la porte à de nombreux articles sur les appareils de mesure des caractéristiques des poudres : on peut alors se pencher sur le travail de G. Lumay en 2012 [12] faisant appel à plusieurs tests pour déterminer l'importance d'une certaine taille de particules sur la fluidité du tas et il rejoint également Sandler, Gnagne et Krantz à propos de la forme des particules [13, 14, 15]. Dès 2008, les rhéomètres sont utilisés pour évaluer la viscosité d'un lit de poudre [24]. Certains de ces travaux se basent sur les états de fluidisation d'une poudre définis par De Jong en 1999 [25] qui sont les états que peut prendre une poudre lorsqu'elle est manipulée. Ainsi, une poudre peut être compacte, très fine lorsqu'elle est en suspension dans l'air ou dans des stades intermédiaires plus ou moins compacts. G. Lumay lors de ses essais [12] arrive alors à caractériser les poudres en fonction de 5 propriétés dont certains sont utilisés dans l'étude de ce mémoire :

- Sa compacité,
- Sa vitesse de compaction,
- Sa granulométrie,
- Son angle de repos,
- Son angle d'avalanche dans un tambour en rotation.

Plusieurs fabricants d'appareils de laboratoire (Brookfield, Freeman et Hosokawa pour les principales compagnies de fabricants) ont développé leurs outils pour proposer jusqu'à 10 propriétés mesurables sur une seule poudre. C'est ce genre d'appareil que nous utiliserons

pour nos tests afin de caractériser les propriétés des poudres et pouvoir choisir parmi ces propriétés les plus pertinentes pour le type de mouvement auquel elles sont soumises dans l'ensacheuse. Dès lors, certains chercheurs se sont intéressés à la comparaison entre les différentes propriétés mesurables via ces appareils et sont arrivés à des conclusions similaires recommandant certaines mesures en fonction des sollicitations auxquelles les poudres étaient réellement soumises dans le processus industriel étudié [13, 15-17].

1.2.2 Détermination des mesures à réaliser

La revue de littérature montre que les propriétés des poudres dépendent grandement de la sollicitation qu'elles subissent. En effet, il est connu qu'une poudre compressée ou aérée n'a pas le même comportement dynamique, et plusieurs propriétés sont donc mesurables selon l'état de la poudre et la sollicitation qu'elle subit. Ces propriétés sont répertoriées dans le tableau 1 ci-dessous.

Tableau 1 : Définitions des propriétés mesurables sur les poudres

Propriété mesurable	Sollicitation	Définition
Granulométrie	Aucune	Mesure de la taille des particules et de leur distribution
Porosité	Aucune	Mesure de cavités éventuelles des particules
Forme des particules	Aucune	Mesure des formes des particules et de leur distribution
Angle de repos	Écoulement guidé (entonnoir étroit)	Mesure de l'angle formé par le tas de poudre au repos, après déversement sur un plateau
Densité en vrac	Écoulement guidé (entonnoir large)	Mesure la masse par unité de volume de la poudre dans son état en vrac, versée sans sollicitation particulière

Densité compactée	Tassement répété	Mesure la densité maximale de la poudre, après plusieurs centaines de tassements répétés
Angle d'avalanche	Mise en mouvement du tas	Mesure l'angle d'inclinaison du tas pour lequel un écoulement commence à se produire
Vitesse de compaction	Tassement répété	Mesure le nombre de tapes nécessaires pour obtenir la moitié du tassement maximal
Indice de fluidité	Rhéomètre à hélice	Mesure la viscosité apparente de la poudre pour établir sa fluidité
Force de décohésion	Poudre compressée par un piston	Mesure la force transverse nécessaire à décompacter la poudre compactée
Aération	Fluidisation par un filet d'air	Mesure la capacité de la poudre à s'aérer et à gagner en volume
Perméabilité	Pression d'air appliquée sur la poudre	Mesure la capacité de l'air à laisser s'échapper de l'air entre ses particules
Relaxation	Retour de l'état aéré à l'état en vrac	Mesure la capacité de la poudre à retrouver son état en vrac rapidement ou non après avoir été aérée.

Les méthodes de mesure et les indices pris en compte doivent donc être mesurés via des sollicitations proches de celles subies par le tas lors du processus industriel. Il faut donc réussir à comprendre comment est sollicitée la poudre lors de l'ensachage. C'est pour cela que parmi les propriétés mesurables existantes dans la littérature et dans les normes relatives à la rhéologie des poudres, il faut effectuer un tri pour ne s'intéresser qu'aux mesures liées aux sollicitations que le tas de poudre subit dans la machine d'ensachage.

Le tableau 2 résume les principales mesures possibles sur les poudres et quelques informations à propos de ces mesures. Le but du projet est de trouver un ensemble de propriétés quantitatives simples et rapides à mesurer et permettant de définir un modèle de prédiction capable de prédire les performances à l'ensachage. Dans un premier temps, les mesures microscopiques, qui sont longues et coûteuses à obtenir, sont mises de côté. Nous

n'incluons pas non plus les propriétés qui demandent des appareils trop coûteux, car cette étude est une première validation de la possibilité de développer un modèle de prédiction.

Tableau 2 : Résumé des propriétés mesurables sur les poudres

Propriété mesurable	Impact sur l'ensachage	Échelle	Facilité et/ou rapidité de la mesure. Prix de l'appareil
Granulométrie	Oui	Microscopique	Long et coûteux
Porosité	Oui	Microscopique	Difficile et coûteux
Forme des particules	Oui	Microscopique	Long et coûteux
Angle de repos	Oui	Macroscopique	Simple et peu coûteux
Densité en vrac	Oui	Macroscopique	Simple et normalisé
Densité compactée	Oui	Macroscopique	Nécessite un appareil, mais normalisé
Ratio de Hausner	Oui	Macroscopique	Nécessite l'appareil de compaction
Angle d'avalanche	Incertain	Macroscopique	Redondant avec l'angle de repos. Appareil coûteux
Vitesse de compaction	Incertain	Macroscopique	Long et appareil coûteux
Indice de fluidité par rhéomètre à hélice	Oui	Macroscopique	Appareil très coûteux
Force de décohésion	Non	Macroscopique	Nécessite un appareil

Aération	Oui	Macroscopique	Aucun appareil disponible sur le marché. Semble réalisable et rapide.
Perméabilité	Oui	Macroscopique	Aucun appareil disponible sur le marché.
Relaxation	Oui	Macroscopique	Appareil très coûteux et mesure très lente

Dans la plupart des publications scientifiques étudiées, il est mentionné que les poudres sont des produits très sensibles aux différentes sollicitations auxquelles elles sont soumises [25]. Selon ce principe, on doit pouvoir faire le lien entre les propriétés mesurées avec des appareils simples et la façon dont la poudre est sollicitée dans la machine.

Dans la machine d'essais qui est schématisée par la figure 1, la poudre est stockée d'abord dans le déversoir qui est un grand entonnoir dans lequel un agitateur permet d'éviter qu'elle ne se comprime sous son propre poids. Ce déversoir s'ouvre sur la vis sans fin qui en tournant va accompagner la poudre vers le sac. Lors de son transit, la poudre est versée, elle est donc dans son état en vrac et elle se dépose sur les filets de la vis et elle se répartit le long de ces filets selon son angle de repos. Autour de la vis, un tube en acier inoxydable fait office de paroi et de fermeture de la vis à son extrémité. Ce tube peut coulisser autour de la vis pour laisser une certaine hauteur d'ouverture pour permettre à la poudre de s'écouler de la vis dans le sac qui est monté par un bras de robot autour de la vis. Elle se dépose dans le fond et pendant cette étape elle est aérée, puis elle se compacte sous son propre poids. Le schéma ci-dessous illustre le trajet de la poudre dans la machine et fait le parallèle entre les sollicitations qu'elle subit et ses propriétés.

Le schéma de la figure 1 montre les différentes sollicitations auxquelles est soumise la poudre lors de son passage dans l'ensacheuse.

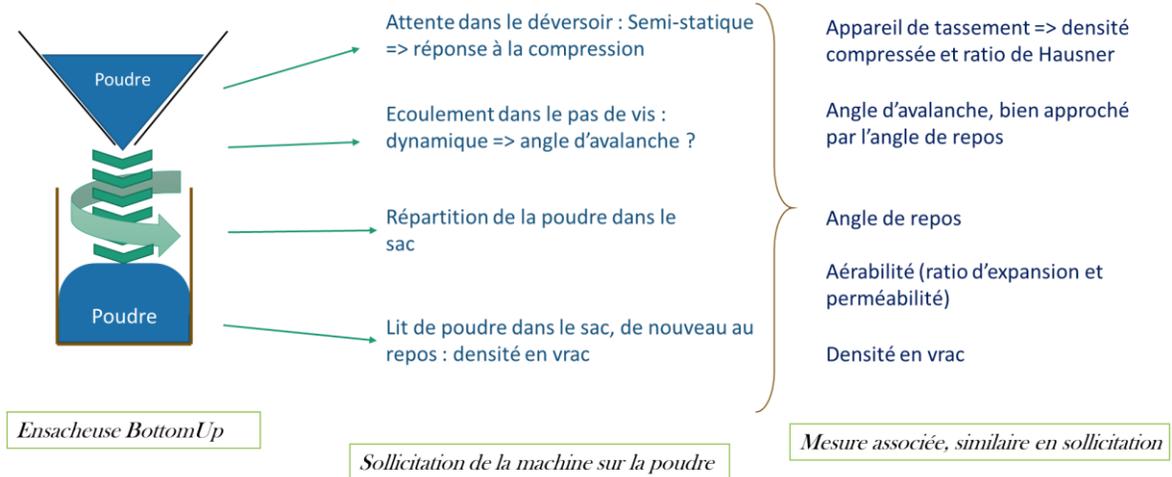


Figure 1 : Schéma des sollicitations subies par une poudre lors de son ensachage

À la suite d'une étude approfondie des articles cités plus haut, l'angle d'avalanche et la vitesse de compaction de la poudre ne seront pas étudiés : le premier est très fortement corrélé à l'angle de repos et serait donc redondant et le second n'est pas mesurable avec les appareils disponibles à faible coût. Enfin, lors de l'échappement de la poudre de la vis dans le sac, la poudre sera aérée lorsqu'elle quittera la vis et tombera dans le sac. Ce comportement est donc très proche de la mesure du coefficient d'aération qui se fait en envoyant un filet d'air dans un lit de poudre. Le coefficient d'aération est donc considéré comme une propriété qui devrait avoir un impact non négligeable sur l'écoulement.

L'impact de chaque propriété sur l'écoulement sera étudié après avoir présenté toutes les mesures. À la suite de cette étude, les choix effectués seront discutés tout en sachant que certaines propriétés du Tableau 2 pourraient être pris en compte dans la caractérisation des poudres pour une étude future.

Enfin, tous les essais qui vont être réalisés durant cette étude le seront dans un environnement semi-contrôlé où la température et l'humidité ne varient pas de manière significative. Ces deux variables ne seront donc pas intégrées au modèle pour expliquer le comportement des poudres.

Les poudres seront donc caractérisées par les propriétés suivantes :

- Angle de repos
- Répétabilité de l'angle de repos
- Densité en vrac
- Densité compactée
- Ratio de Hausner
- Ratio d'expansion du lit de poudre après aération
- Coefficients de perméabilité à l'aération

1.2.3 Présentation des appareils utilisés

Les mesures qui sont proposées sont toutes utilisées dans une ou plusieurs des publications citées dans les parties précédentes. Les appareils qui sont utilisés sont pour la plupart rattachés à des normes et sont disponibles sur le marché des équipements de laboratoire. Plusieurs fabricants proposent des appareils de toutes sortes qui permettent de mesurer la rhéologie des poudres. La rhéologie est l'étude de la déformation et de l'écoulement de matière sous l'effet d'une contrainte. Dans la pratique et dans le domaine des poudres, elle permet de décrire le comportement mécanique qui ne pourrait pas l'être par des théories classiques. Une étude au préalable du marché a montré que les rhéomètres à hélice qui permettent de calculer un indicateur de la fluidité d'une poudre sont très onéreux (plusieurs dizaines de milliers de dollars). Pour cette raison, cette propriété n'est pas prise en compte dans cette étude. Il s'agira donc de ne pas l'étudier dans cette étude qui est un lancement de l'étude des poudres dans ce contexte, mais cette propriété pourra être intégrée plus dans une prochaine étude si nécessaire. Pour l'aération de la poudre, un appareil de

mesure est créé et permet de garder ces propriétés qui semblent avoir un impact important sur l'ensachage. L'analyse des corrélations entre les mesures permettra de discuter ces choix.

Afin de réaliser la caractérisation rhéologique des poudres via les mesures citées ci-dessus, des appareils commerciaux et des appareils fabriqués à l'interne ont été utilisés. L'angle de repos et la densité compactée sont mesurés avec des appareils développés par le fabricant Qualtech Products Industry. Les autres propriétés, la densité en vrac, le coefficient d'aération et le ratio d'expansion sont mesurés avec des appareils fabriqués à l'interne. En ce qui concerne le ratio d'Hausner, on le déduit de la densité compactée et de la densité en vrac.

Les 4 protocoles de mesures qui ont été mis en place pour caractériser les poudres avec ces appareils sont disponibles en annexe I.

A. Mesure de l'angle de repos

L'appareil de mesure de l'angle de repos d'une poudre proposé par Qualtech Product Industry est un montage complètement manuel, comportant un entonnoir ainsi qu'un agitateur pour aider la poudre à s'écouler. Celle-ci s'écoule sur un plateau tournant monté sur un roulement à billes. Celui-ci permet de mesurer avec le rapporteur l'angle formé par le tas en plusieurs endroits. Le roulement à billes permet une rotation fluide, qui nécessite peu de force de la part de l'opérateur et donc qui permet d'éviter toutes vibrations qui pourraient avoir un impact sur le maintien du tas dans sa position à mesurer. Tout le montage est fabriqué en acier inoxydable comme le montre la photo de la figure 2 et est donc vraiment durable et hygiénique. De plus le fabricant propose un protocole de mesures qui sera largement utilisé pour créer le protocole de mesure de l'angle de repos d'une poudre.

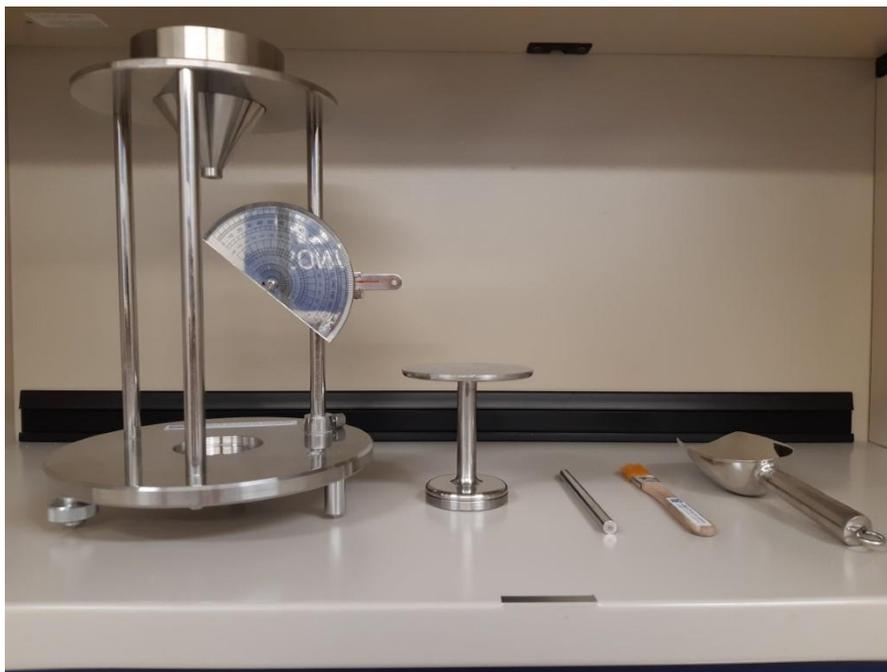


Figure 2 : Appareil de mesure de l'angle de repos

Le plateau tournant (2^e en partant de la gauche sur la Figure 2) facilite grandement la mesure de l'angle de repos en plusieurs points du tas. Comme la poudre s'écoule sur un plateau assez haut par rapport au socle, la base du tas est toujours bien circulaire et le tas est toujours de forme conique même si de la poudre est ajoutée après la formation complète du cône.

Le rapporteur d'angle est quant à lui placé sur le côté et sa position est réglable en hauteur. Il est fixé sur un pivot au niveau de son centre afin de s'adapter parfaitement à la forme du tas. Il peut être avancé vers le tas si nécessaire. Néanmoins la position du rapporteur mesure l'angle opposé à l'angle de repos d'une poudre comme le montre la figure ci-dessous.

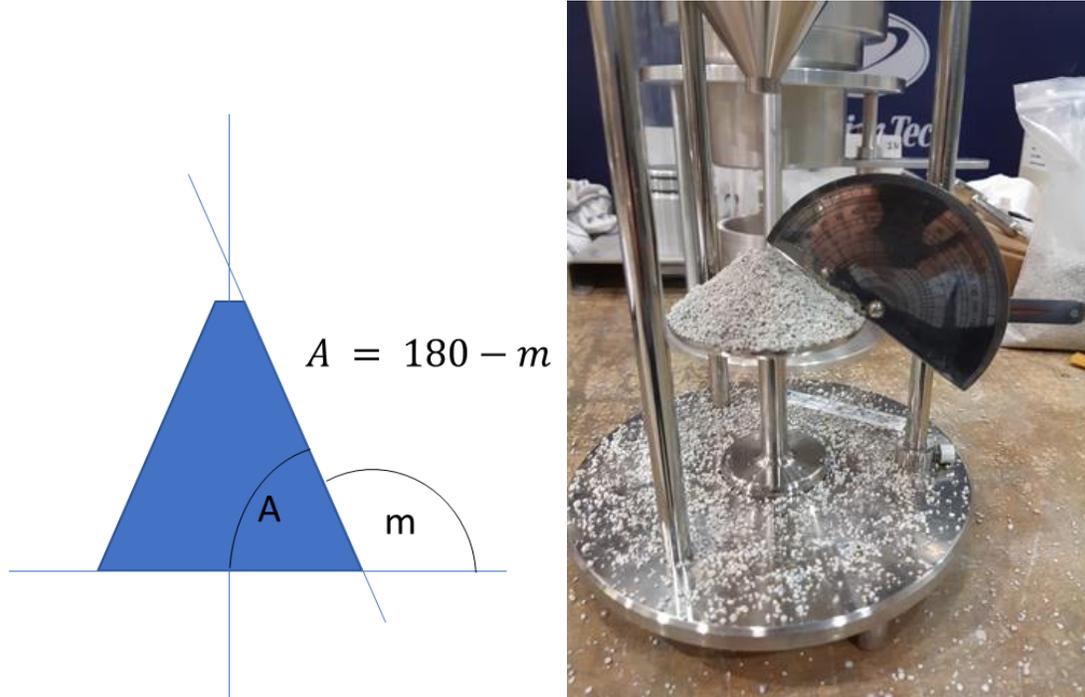


Figure 3 : Schéma de mesure de l'angle (gauche) et Appareil de mesure réelle (droite)

L'angle mesuré est donc l'angle supplémentaire (figure ci-dessus) et lorsque la mesure est entrée dans la fiche de la poudre sur le tableur, le calcul se fait automatiquement pour récupérer la vraie valeur de l'angle (A) de repos de la poudre. Ce dispositif permet également de mesurer un autre paramètre intéressant dans la caractérisation des poudres : la stabilité de l'angle de repos, ou sa répétabilité. En effet la mesure de 3 angles sur le tas est répétée 3 fois ce qui donne 9 mesures d'angle. Il est alors intéressant d'observer le pourcentage de stabilité de cet angle en calculant l'écart-type de ces 9 mesures :

$$S_{angle} = \frac{EcartType(9valeurs)}{Angle_{moyen}}$$

Ce paramètre peut également s'exprimer en pourcentage, mais dans le reste de l'étude il sera laissé dans ce format.

B. Mesure de la densité compactée

La mesure de la densité compactée de la poudre est plus complexe : il faut réaliser un certain nombre de tassements d'une quantité de poudre dont la masse est connue pour atteindre un volume critique, le volume compacté. La densité est ensuite calculée via la formule :

$$D_{tassée} = \frac{Masse}{V_{tassé}}$$

La norme ISO 787/11 définit comment cette propriété doit être mesurée et prévoit la conception du dispositif. Dans ce sens, un récipient contenant la poudre est monté à quelques millimètres d'une enclume sur laquelle il retombe, sollicitant ainsi la poudre pour qu'elle se tasse sur elle-même lors du choc en libérant l'air contenu dans les interstices interparticules.

La norme prévoit donc de réaliser ce tassement avec une came qui, entraînée par un moteur, transmet un mouvement vers le bas et vers le haut à une éprouvette graduée qui contiendrait la poudre. Cette solution est donc retenue par le fabricant de cet appareil illustré par la Figure 4, et cela permet donc de disposer d'un appareil prêt à l'emploi. De plus, le fabricant (Qualtech Products Industry) livre avec l'appareil des accessoires qui permettent de protéger les contenants en verre lors des chocs à répétition.



Figure 4 : Appareil de mesure de la densité compactée

Selon la poudre qui est étudiée, le nombre de tassements recommandés varie. Le but de ces tassements est d'être certain qu'à la fin des tassements la poudre soit dans son état le plus compacté possible. Or, certaines poudres sont largement tassées en seulement 50 tapes alors que d'autres en nécessitent 100, 200 voire plus. La norme ISO 8967 (FIL 134) stipule que pour des poudres de lait un nombre de tapes de 625 suffit et permet d'obtenir à coup sûr un compactage complet. C'est donc ce nombre qui sera utilisé pour toutes les poudres alimentaires à l'étude dans le cadre de ce projet, avec l'appareil dont la photo à vide est disponible à la Figure 4 et dont la photo avec une poudre à mesurer est disponible à la Figure 5.



Figure 5 : Appareil de la mesure de la densité compactée d'une poudre

Les 2 appareils qui vont être présentés ont été réalisés à l'interne par les équipes travaillant autour du projet à l'entreprise. Cela a permis de disposer des appareils de caractérisation rapidement, avec une bonne précision de mesure et pour un coût minime.

C. Mesure de la densité en vrac

Afin de caractériser la densité en vrac, le dispositif visible à la figure suivante est fabriqué en interne en suivant la norme ISO 697.



Figure 6 : Appareil de mesure de la densité en vrac d'une poudre

Premièrement afin de caractériser la densité en vrac, la norme prévoit l'utilisation d'un entonnoir qui permet à la poudre de chuter dans un récipient dont le volume est connu. Le fonctionnement de cet appareil est entièrement manuel : le trou est débouché en faisant pivoter la pièce qui empêche la poudre de s'échapper lorsqu'elle est versée. La poudre s'écoule alors d'un seul coup dans le récipient, et si ce n'est pas le cas, il est possible de l'aider en effectuant un trou dans le lit de poudre pour amorcer sa chute. Tout l'appareil est entièrement réalisé en aluminium et est donc léger, pratique à nettoyer et à ranger en plus d'être facile d'utilisation. Sa fabrication robuste en fait un appareil très simple et facilement reproductible.

La poudre doit remplir le récipient plus haut que son bord pour être égalisée et que la surface forme exactement une surface plane. Ainsi le volume est toujours le même, peu importe les essais ce qui rend la mesure vraiment fiable. Cette étape, illustrée par la figure

suivante, est primordiale pour obtenir une mesure stable et éviter les erreurs de mesures, et est précisée dans le protocole associé (voir annexe I). La mesure est répétée trois fois comme le conseille la norme associée à cette propriété, ce qui sera précisé en partie 1.



Figure 7 : Photo illustrant l'obtention d'une surface plane pour un volume précis

De plus, grâce à la mesure des 2 densités exprimées précédemment, il est possible de calculer une propriété caractéristique des poudres qui est très utilisée dans les publications scientifiques traitant de la mesure des poudres, le ratio de Hausner, calculé par la formule suivante :

$$Hr = \frac{Densité_{Compactée}}{Densité_{Vrac}}$$

Ce ratio décrit la capacité de la poudre à se compacter, et est donc toujours supérieur ou égal à 1.

D. Mesure de l'aération

Enfin, le dernier dispositif utilisé pour caractériser les poudres mesure la tendance de la poudre à s'aérer. Cet appareil est composé d'un tube dans lequel la poudre sera aérée et d'un circuit pneumatique permettant de réguler l'air destiné à traverser la poudre. Le débit d'air et la pression dans le circuit sont réglables par des vannes manuelles et la pression dans le circuit est mesurée par un manomètre numérique. Le montage des différents éléments pneumatiques et la mise en place des capteurs ont fait partie des actions de recherche et de développement de ce projet.

Ce dispositif n'est pas rattaché à une norme, mais quelques publications font état de son utilisation et des indices qui sont mesurés [22]. Comme l'ensachage des poudres fait intervenir un problème lié à la poussière et à l'aération du matériau qui peut alors prendre trop de place dans le sac, il a été décidé d'effectuer cette mesure pour observer son impact sur l'ensachage des poudres.

Le socle, le support du tube et le tube sont usinés en ayant comme préoccupation de réduire les coûts et de rendre l'appareil précis et fonctionnel. La conception a cherché à miniaturiser le dispositif et améliorer son ergonomie. Comme il est possible de le voir sur les photos ci-dessous, l'appareil nécessite d'être branché au réseau électrique et pneumatique de l'usine.



Figure 8 : Appareil de mesure de l'aération d'une poudre (avant et arrière)

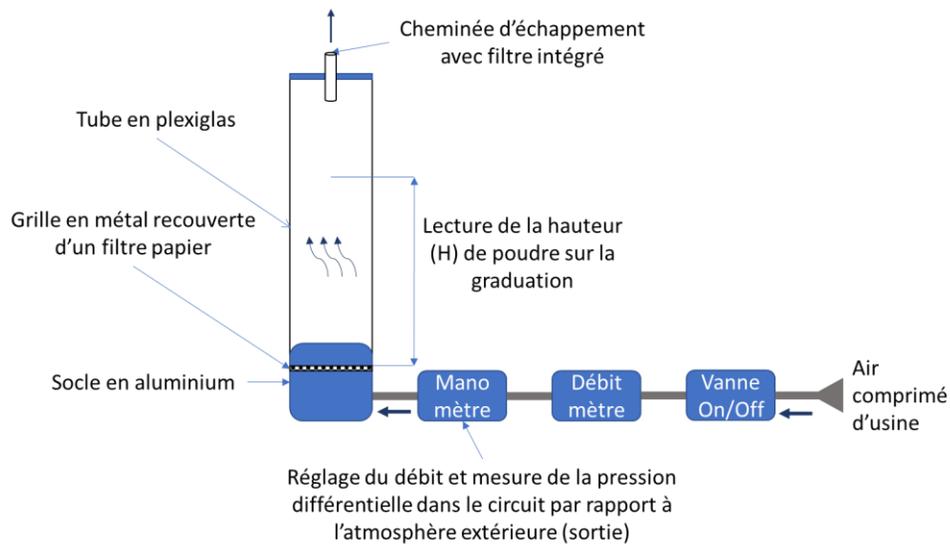


Figure 9 : Schéma de l'appareil d'aération et des mesures effectuées grâce à lui

Pour mesurer la capacité de la poudre à s'aérer, il s'agit de faire passer de l'air au travers d'un volume de poudre. Comme le montre le schéma de la figure 9, l'air est amené dans le tube qui contient le volume de poudre et ce flux d'air va alors traverser la poudre. Le volume occupé par la poudre va alors augmenter et le ratio de cette augmentation (noté BER, pour « Bed Expansion Ratio ») est utilisé pour caractériser la poudre. Ce ratio est calculé en effectuant le ratio du volume avant l'aération de la poudre et après, volumes qui sont lisibles grâce aux graduations collées sur le tube de plexiglas. Ce ratio permet si nécessaire de calculer ensuite la densité aérée à partir de la densité en vrac du produit versé dans le tube :

$$BER = \frac{V_{aéré}}{V_{vrac}} = \frac{H_{aéré}}{H_{repos}}, \text{ donc } D_{aérée} = \frac{M_{aérée}}{V_{aéré}} = \frac{M}{V_{vrac} * BER} = \frac{D_{vrac}}{BER}$$

De plus, les poudres vont aussi avoir une pression de saturation qui va dépendre de la pression de consigne. La pression de consigne est la pression dans le circuit d'air avant qu'il ne soit branché au dispositif contenant la poudre. En s'échappant par la poudre, l'air va être ralenti par celle-ci et cela va donc augmenter la pression dans le circuit en amont de la quantité de poudre, c'est-à-dire juste à l'entrée du dispositif. Le manomètre va donc être

capable de mesurer cette pression stabilisée et c'est cette pression qui va caractériser la capacité de la poudre à laisser passer l'air ou non. En effet le lit de poudre va agir comme une membrane plus ou moins perméable qui va augmenter la pression dans le circuit avant le tube pour laisser l'air s'échapper à pression ambiante dans le haut du tube, puis dans l'atmosphère environnante.

Les mesures sont effectuées pour plusieurs pressions d'air en entrée du tube contenant le lit de poudre : 0,4 ; 0,6 ; 0,8 et 1 kPa. Le ratio d'expansion utilisé pour définir la poudre est la moyenne des 4 valeurs de ratio d'expansion obtenues. La perméabilité du lit de poudre est le coefficient directeur reliant la pression d'air dans le lit de poudre à la pression en entrée.

$$P_{fluidisée} = C_{perméabilité} * P_{consigne} + constante$$

En effet après plusieurs tests, les courbes d'évolution de la pression sont remarquablement linéaires pour quasiment toutes les poudres. Ce coefficient directeur promet donc d'être un bon indicateur pour définir la perméabilité à l'air du lit de poudre.

À titre d'exemple de la réalisation de cette mesure, les deux photos de la figure 10 ci-dessous sont prises au cours de la caractérisation de deux poudres complètement différentes. Sur ces deux photos, on peut observer 2 comportements différents que peuvent avoir les poudres. La première est une poudre de soya dont les particules, très fines et très légères, ont tendance à s'agglomérer. Cette poudre va s'aérer en bloc, et ses agglomérations de particules vont se soulever pour se réarranger afin que l'air puisse s'échapper à différents endroits dans la colonne d'aération. La seconde est une farine de blé qui est tout aussi fine, mais ne s'agglomère pas autant. Cette poudre a tendance à former de la poussière. Le tableau 3 qui suit permet d'observer la caractérisation complète de ces deux poudres. Il est intéressant de noter que la poudre la plus poussiéreuse rend la lecture de la hauteur plus difficile. Pour clarifier ce point, le protocole prévoit de prendre la moyenne entre la hauteur maximale à laquelle la poudre a été projetée et la hauteur minimale de son expansion. Cela permet d'éviter les interprétations de la personne qui effectue la mesure.



Figure 10 : Aération d'une poudre de soya (gauche) et d'une farine de blé (droite)

Tableau 3 : Comparaison des caractéristiques de ces 2 poudres

Poudre	Angle de repos (degrés)	Stabilité de l'angle (%)	Densité compactée (g/mL)	Ratio de Hausner	Ratio d'expansion	Coefficient de perméabilité
Soya	28,83	8,4	0,427	1,745	1,07	1,67
Farine de blé	59,11	1,5	0,735	1,451	1,26	1

Les 4 mesures précédant l'aération permettent de se faire une idée plus complète de la différence entre ces deux poudres. Au niveau de leur aération, il est clair que la farine de blé

va gagner beaucoup plus en volume que le soya puisque son ratio d'expansion est bien supérieur. Comme la poudre de soya a tendance à s'agglomérer, l'air soulève la poudre en se frayant de multiples chemins. Cette caractéristique permet à l'air de s'échapper plus en contournant les mottions et sans aérer le lit de poudre autant que dans le cas de la farine de blé. En effet, cette dernière est très poussiéreuse et a tendance à se fluidiser très facilement à cause de l'aération par l'air sous pression. Sa densité varie donc fortement avec l'aération par le flux d'air qui peut facilement s'échapper par la poudre qui est devenue très aérée. Ce comportement est observé par le coefficient de perméabilité qui est bien plus faible pour la farine de blé : l'air a peu de difficulté à s'échapper à travers le lit de poudre, alors que le soya forme une membrane moins perméable : la pression dans le circuit restera forte, car l'air s'échappera par de petites cheminées peu nombreuses.

Cette expérience montre qu'il est possible de mesurer la tendance d'une poudre à être fluidisée ou non par un flux d'air, et donc sa tendance ou non à former de la poussière lors de l'ensachage. Cette expérience ouvre également la porte vers une étude de l'empoussièrement lors de l'ensachage. Ce phénomène apparaît pour certaines poudres très volatiles et n'a pas pu être étudié dans ce projet par manque de poudres ayant ce comportement. Néanmoins l'appareil permettant de caractériser facilement l'aération d'une poudre est fonctionnel et pourrait être utilisé pour caractériser l'empoussièrement d'une poudre lors de son ensachage dans la machine.

1.3 CRÉATION DU LABORATOIRE

Les 4 appareils de caractérisation ont été présentés. Dans cette section, on s'intéresse à leur manipulation afin d'obtenir des mesures fiables. Pour les appareils, les protocoles sont basés sur les indications fournies par le fabricant. Pour les autres ce sont des tests répétés et la lecture des différentes références à propos de ces mesures qui ont permis de mettre en place des protocoles clairs et précis.

1.3.1 Préparation des échantillons avant les mesures

Les poudres sont des matériaux très sensibles aux différentes sollicitations : leurs propriétés peuvent grandement varier selon l'état du lit de poudre. Par exemple, la densité en vrac sera grandement impactée tout comme sa capacité à s'aérer selon que la poudre a été au préalable aérée, compactée ou s'est compactée naturellement après un temps prolongé en stockage. Pour éviter que les sollicitations antérieures aient un impact sur la caractérisation et faire en sorte que les mesures soient comparables, peu importe le temps de stockage du matériau, les quantités de poudres nécessaires aux mesures sont aérées avant toute mesure. Pour cela, le volume nécessaire est introduit dans un contenant fermé qui est ensuite tourné dans tous les sens et secoué pour fluidiser et aérer la poudre. Ce protocole d'aération n'est pas précisément établi, il s'agit simplement d'aérer les poudres avant les mesures afin de les caractériser toujours dans le même état de sollicitations.

Dans l'ensacheuse et chez le client, la poudre à ensacher provient d'un procédé de fabrication qui fournit une poudre à l'état fluidisé et non compacté. C'est pour cela que les échantillons sont fluidisés avant chaque mesure. La poudre testée doit être dans un état qui s'approche le plus possible de l'état lors de l'ensachage. Ce choix est expliqué dans les paragraphes suivants ainsi que l'impact qu'il a sur la stabilité des mesures de caractérisation rhéologique.

1.3.2 Étude du nombre nécessaire de mesures par appareil

Les 4 appareils de mesure présentés précédemment doivent fournir une mesure qui décrit correctement la poudre caractérisée. Or certaines mesures ont parfois une variation aléatoire due à l'opérateur, à l'état du produit ou à l'appareil. La fluidisation préalable permet de diminuer grandement les variations attribuables au stockage du produit. Néanmoins,

l'impact aléatoire du produit et de l'appareil est parfois important et il s'agit de le prendre en compte pour avoir une mesure correcte et la plus objective possible.

Pour comprendre comment réagissent les poudres à la caractérisation par les appareils de mesure, leur effet mémoire a été testé en fonction des sollicitations auxquelles les produits sont soumis. Il s'agissait de savoir si les poudres testées sont stables, c'est-à-dire si les mesures successives vont être proches les unes des autres ou bien si le fait de mesurer plusieurs fois le même échantillon va avoir pour effet de faire varier les mesures. Pour cela, les caractéristiques seront mesurées directement sur l'échantillon ou bien après une préparation de l'échantillon en fluidisant la poudre. Après différentes mesures sur les quelques poudres disponibles, il apparaît que cette fluidisation de préparation a un impact positif. La préparation de la poudre avant la mesure permet de stabiliser son comportement dans les appareils de mesure en ayant annulé ses sollicitations précédentes. Toutes les poudres sont alors mesurées dans la même configuration et les mesures peuvent être comparées sans réserve.

Les appareils sont pour la plupart connus et même normalisés. Ainsi, la détermination du nombre de répétitions de la mesure se base sur les sources répertoriées dans le tableau ci-dessous :

Tableau 4 : Utilisation de chaque appareil de mesure

Appareil	Nombre de répétitions de la mesure	Source
Angle de repos	3 fois les 3 mesures d'angle, soit 9 mesures	Protocole conseillé par le fabricant de l'appareil
Densité en vrac	3 fois	La norme ISO 697 conseille au minimum 2 répétitions
Densité compactée	2 fois	Nombre conseillé par la norme ISO 787/11
Aération d'une poudre	1 fois pour 4 pressions	Aucune source

Pour commencer, lors de la mesure de la densité en vrac, il est possible que la poudre s'aère au fur et à mesure des expériences. La norme relative à cette mesure conseille de réaliser au minimum deux mesures sur des échantillons différents. Après plusieurs mesures préliminaires pour observer le comportement de différentes poudres, il a été choisi d'augmenter ce nombre à 3 mesures. Par prudence et pour obtenir une densité en vrac qui décrit le mieux possible la poudre, le protocole établi prévoit donc une mesure de plus que la norme. En effet, certaines poudres ont montré de sensibles variations, ce qui laisse penser que certaines poudres parmi celles ayant un comportement très versatile vont nécessiter 3 prises de mesure. Ces 3 mesures seront faites sur des échantillons différents et toujours avec une préparation pour fluidiser la poudre avant sa chute.

Pour l'appareil de mesure de la densité tassée, la poudre en sortie d'expérience est tassée au maximum. Si on relance la mesure, la poudre ne va pas pouvoir se tasser plus que son état actuel. La norme prévoit 2 prises de mesures. Nous avons vérifié qu'un nombre plus important de mesures conduit à des variations négligeables. La même préparation de l'échantillon est utilisée avant les mesures. Cette mesure combinée avec la précédente permet de calculer le ratio de Hausner. Cette propriété s'exprime par le rapport des densités en vrac et tassées, mais certains l'expriment par le rapport des volumes en vrac et tassés pour la même masse. Or la poudre est très sensible au moindre mouvement dans l'éprouvette et le simple fait de poser l'éprouvette graduée pour lire le volume tasse déjà la colonne de produit. Ainsi le volume versé dans l'éprouvette avant la mesure n'est pas précis : la mesure de la densité en vrac telle qu'elle a été présentée précédemment est bien meilleure. C'est pour cela que le volume de poudre ne sera lu qu'à la fin du tassement pour calculer la densité compactée de la poudre. Ensuite la base de données se chargera de calculer le ratio de Hausner (noté Hr) en suivant l'équation ci-dessous et en utilisant les deux densités mesurées indépendamment.

$$Hr = \frac{D_{tassée}}{D_{vrac}}$$

Pour l'angle de repos, la mesure s'effectue en suivant le protocole suggéré par le fabricant de l'appareil. Celui-ci conseille de mesurer l'angle du tas en trois points différents,

espacés d'environ 120° grâce au plateau tournant à 360° sur lequel repose le tas de poudre et qui est monté sur un roulement à billes pour éviter les vibrations lors de sa rotation. Puis, pour former une moyenne de l'angle de repos, chaque poudre sera mesurée trois fois de cette manière afin d'être le plus juste possible sur la valeur moyenne, soit finalement neuf mesures d'angle. La moyenne de ces neuf mesures est calculée pour être considérée comme l'angle de repos du produit. Une première étude rapide de cet appareil a permis de valider ce protocole suggéré, mais également de trouver une autre piste de caractérisation. En effet, il s'avère que certaines poudres ont un angle qui varie beaucoup que ce soit selon la position de la mesure sur le plateau ou bien d'un échantillon de la même poudre à l'autre. Il a donc été décidé de calculer l'écart-type entre les neuf mesures d'angle. Trois angles sont mesurés sur un même tas à des endroits différents, ce qui nécessite d'effectuer trois fois la mesure. Entre chaque mesure, l'échantillon est remplacé et fluidisé avant de passer dans l'appareil ce qui permet de mesurer les trois tas de la même manière. Comme les mesures sont toutes réalisées dans le laboratoire dédié, les différences de température et d'humidité des différents tas ne sont pas prises en compte car l'environnement est constant durant les mesures. Cet écart-type est appelé « stabilité de l'angle de repos » et il exprime la tendance de la poudre à former des tas différents ou non. C'est donc un paramètre qui semble important pour montrer la fiabilité d'une poudre lors de son écoulement.

$$S_{angle} = \frac{EcartType(9valeurs)}{Angle_{moyen}}$$

Enfin, pour l'appareil d'aération de la poudre, la caractérisation se fait déjà en mesurant quatre fois l'expansion du lit de poudre pour quatre pressions de consigne différentes. Grâce à ces quatre mesures, deux coefficients sont calculés. De la même manière que pour les appareils précédents la préparation de l'échantillon à tester est très importante, car dans un état de long stockage la poudre ne se comporte pas du tout de la même manière et les résultats sont très différents. En effet, si la poudre est plutôt compactée par un stockage prolongé ou simplement par un tassage involontaire, l'air aura plus de difficultés à traverser le lit de

poudre. Son comportement sera donc faussé par rapport à ce qui se passerait dans l'ensacheur. Une étude rapide de l'appareil fabriqué a montré que les variations d'une mesure à l'autre étaient faibles que ce soit pour la mesure du ratio d'expansion ou celle du coefficient de perméabilité. Ce coefficient est le coefficient directeur de la droite, qui peut être calculé par la formule suivante :

$$C_{\text{perméabilité}} = \frac{P_{\text{fluidisée}(1kPa)} - P_{\text{fluidisée}(0,4kPa)}}{P_{\text{consigne}(1kPa)} - P_{\text{consigne}(0,4kPa)}}$$

Si l'on effectue les essais sur la même poudre, mais avec des échantillons différents, le résultat est le même : les variations sont très faibles et elles seront donc négligées. Cette mesure ne sera donc menée qu'une seule fois pour caractériser l'aération de la poudre.

Pour les 3 premiers appareils utilisés dans cette étude, le nombre de mesures est basé sur une norme ou un protocole du fabricant. Pour l'appareil de caractérisation de l'aération, fabriqué à l'interne, le nombre de répétitions pourra être établi de manière plus stricte dans une prochaine étude sur le sujet.

1.3.3 Aménagement d'une salle dédiée

Dans l'optique de poursuivre ce projet avec d'autres produits, pour d'autres machines et surtout de continuer à faire évoluer la base de données, un laboratoire dédié à toutes ces mesures a été aménagé. Dans cette salle, les quatre appareils présentés précédemment sont disponibles, utilisables et sont rangés proprement avec une photo permettant un inventaire rapide du matériel nécessaire à la mesure, pour chaque placard. Ce laboratoire permet aussi d'avoir un espace de travail grand et donc d'utiliser les 4 appareils en même temps pour une efficacité maximale des mesures.

Après chaque essai, il est possible d'entrer directement les mesures dans la base de données puisqu'un ordinateur est disponible dans la salle, avec un accès réseau qui permet de consulter et de mettre à jour le fichier des données. De plus, un tableur supplémentaire permet de faire l'état des échantillons présents dans le laboratoire et leur position dans le

processus de mesure : ont-ils été caractérisés ou non et cette poudre a-t-elle été mesurée dans l'ensacheur ?

Cette salle comporte donc un espace de rangement dédié aux échantillons récoltés pour chaque produit étudié. Le placard de rangement est séparé en 3 colonnes de casiers et il a donc été décidé de séparer les produits testés pour mieux les classer : les poudres, les granulés et les noix ont donc chacun leur colonne d'échantillons. Ce rangement permet une évolution du laboratoire vers la caractérisation de tous les produits qui sont ensachés, peu importe le type de machine créée pour les manipuler, puisqu'il est possible de stocker plus d'une centaine d'échantillons.

1.4 ÉTUDE DES POUDRES DANS L'ENSACHEUSE INDUSTRIELLE

1.4.1 Étude de l'ensacheuse

Le comportement de la poudre que l'on veut prédire est celui lors de l'ensachage dans une machine à remplissage par le bas (Bottom Up feeding). L'intérêt de ces ensacheuses est de déposer la poudre au fond du sac pour éviter autant que possible les dégagements de poussière. Le sac est donc monté autour d'une colonne de remplissage qui s'ouvre d'une certaine hauteur et permet au produit de se déverser dans le sac, accompagné par une vis sans fin. Selon les produits manipulés, selon les tailles des sacs et selon les besoins du client, plusieurs tailles de vis peuvent être montées dans la machine et plusieurs pas de vis différents peuvent être utilisés.

Afin de standardiser le banc de tests qui sera utilisé tout au long de ce projet, il a été nécessaire de fixer certaines composantes de la machine : la vis utilisée a un diamètre et un pas qui sont définis comme les valeurs standards de ce procédé, le sac utilisé doit être le plus grand possible, peu importe le produit afin que toutes les mesures se fassent dans les mêmes conditions. Les ouvertures de la vis sont fixées à 3 valeurs nommées S, M et L et qui peuvent se cumuler, ce qui permet d'avoir 5 ouvertures caractéristiques de l'écoulement : S, M, S+M, L et S+M+L. Un plus grand nombre de combinaisons d'ouvertures seraient possibles en

combinant les trois ouvertures de base, mais les 5 retenues sont celles les plus utilisées dans les configurations de la machine chez les clients. Elles vont donc définir de manière complète l'ensachage-test dans cette machine de référence puisqu'elles représentent toutes les phases d'ensachage. En effet, ces 5 ouvertures permettent de mesurer l'ensachage de la poudre dans 2 modes différents : le remplissage grossier qui verse beaucoup de poudre dans le sac, très rapidement, et le remplissage fin qui est plus lent et permet un remplissage plus précis à la fin de l'opération. Le schéma ci-dessous illustre l'ouverture et la fermeture du système de remplissage par vis. Le sac est amené par un bras de robot autour de la vis pour que la poudre soit déposée dans le fond ce qui évite la poussière, puis il est descendu au fil de son remplissage.

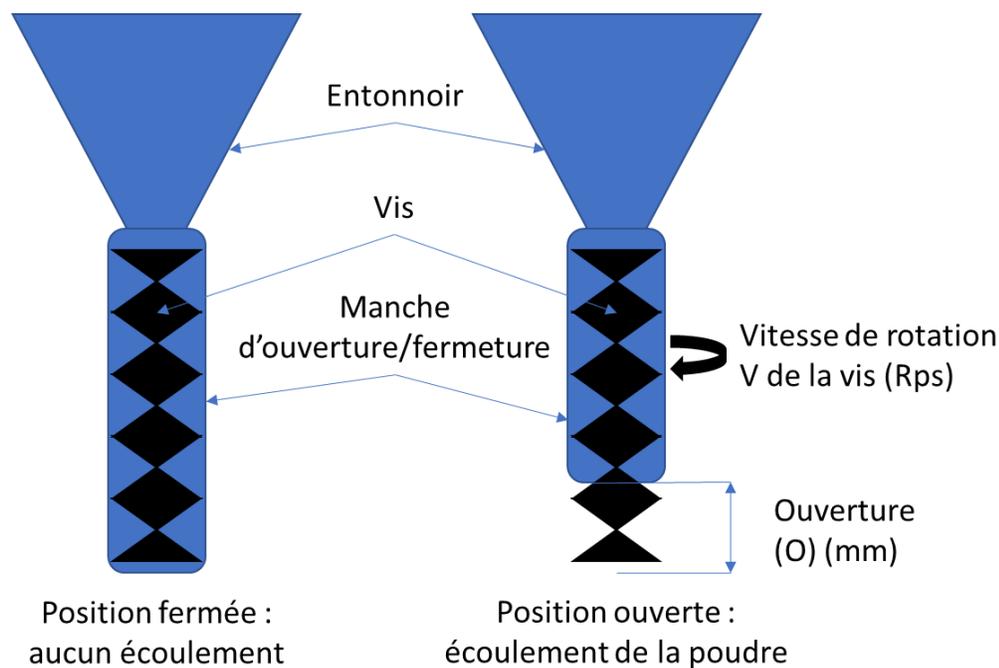


Figure 11 : Schéma de la machine de remplissage par le bas, de sa vis et de son ouverture

1.4.2 Définition du protocole de tests sur la machine de référence

Le protocole de tests qui sera appliqué tout au long de ce projet se base sur les recettes utilisées par Premier Tech et sur l'expertise développée au fil du temps. Comme cela a été vu dans les parties précédentes, trois ouvertures sont utilisées : S, M et L. Ces ouvertures peuvent être combinées et le tableau suivant récapitule les cinq ouvertures qui seront utilisées pour mesurer l'ensachage de la poudre. Les ouvertures sont réalisées par des vérins pneumatiques ce qui permet de les combiner pour bénéficier de plusieurs tailles d'ouvertures différentes, comme le montre le tableau suivant.

Tableau 5 : Correspondance entre la lettre et la hauteur en mm de l'ouverture d'ensachage

Lettre correspondant à l'ouverture	Ouverture de remplissage en mm
S+M+L	120,7
L	63,5
S+M	57,15
M	31,75
S	22,23

Afin d'uniformiser le protocole pour toutes les poudres testées, et après plusieurs tests de ce protocole pour trouver la meilleure méthodologie à suivre, le protocole est le suivant :

- Le sac est monté à une position de référence, autour de la vis
- Seul le mode de remplissage 'Blind' de la machine est utilisé : c'est-à-dire que le sac reste immobile et que la poudre est ensachée pendant un temps fixé pour toutes les configurations : 2 secondes.

- Environ 5 à 6 sacs de 25 kg sont utilisés pour charger la machine et conduire les essais.
- Afin de charger la vis en produit et de bien ouvrir les sacs de tests, 3 sacs seront remplis avec une grande ouverture avant de commencer les mesures.
- Afin de configurer la machine pour chaque essai, l'utilisateur du banc de test doit changer manuellement la hauteur d'ouverture et la vitesse de la vis lorsque cela est nécessaire puisque cette recette de tests reste semi-automatique.
- Comme la précision de remplissage est importante pour la détermination du comportement de la poudre, chaque mesure sur chaque configuration de la machine est répétée 4 fois pour chaque vitesse, ce qui conduit à 4 essais pour 5 vitesses et pour 5 ouvertures soit 100 mesures pour chaque poudre.

Ce protocole permet de mesurer le comportement de la poudre pour différentes ouvertures et vitesses de remplissage. Ainsi, le comportement de la poudre dans la machine est connu pour toutes les configurations de celle-ci. Cela permettra par la suite de recréer entièrement une recette d'ensachage et même éventuellement de la prédire entièrement. Avant le présent projet, les recettes d'ensachage optimales étaient déterminées par tâtonnements et en testant plusieurs dizaines de fois chaque combinaison d'ensachage. Ces tests permettaient de trouver la combinaison de paramètres permettant un remplissage le plus rapide possible. Les tests permettaient également d'établir la précision de l'ensachage. La précision est un critère de premier plan parce que le poids final du sac contenant la poudre doit être toujours le même, à quelques grammes près. Ces tests permettaient de promettre au client une cadence et une précision d'ensachage à 95 %, c'est-à-dire par exemple que pour un sac de 25 kg, l'ensacheuse mettra toujours entre 25 et 25,10 kg de poudre dans le sac dans 95 % des cas, si la précision à 95 % est de 10 grammes. En effet l'ensacheur doit respecter le poids minimal du sac, inscrit dessus, tout en évitant de trop le remplir pour éviter de vendre à perte une partie du produit. Il doit toutefois remplir le sac le plus vite possible.

1.4.3 Données récoltées : performance de la poudre à l'ensachage

Les données récoltées sont reportées dans le tableau suivant faisant partie de la base de données. La partie de gauche récolte les mesures de poids ensaché par la machine selon les différentes configurations et la partie de droite récolte les mesures des caractéristiques mesurées dans le laboratoire :

Tableau 6 : Caractérisation complète d'une poudre – Feuille de mesures manuscrites

Ouverture	Vitesse	Masse ensachée : 4 répétitions de la mesure				Mesure des paramètres caractéristiques			
S+M+L	4 RPS					Nom de la poudre		Date	
	5 RPS					Type de poudre	Acronyme de l'équipier		
	6 RPS								
	8 RPS					Client			
	9 RPS					Angle de Repos	Densité en vrac	Densité compactée	
Commentaire :						Mesure répétée 3*3 fois	Mesure répétée 3 fois	Mesures répétées 2 fois	
L	4 RPS					Angle (Deg)	Masse (g)	Masse (g)	Volume tassé (mL)
	5 RPS								
	6 RPS								
	8 RPS								
	9 RPS								
Commentaire :									
M+S	0.5 RPS								
	1 RPS								
	2 RPS								
	3 RPS								
	4 RPS								
Commentaire :									
M	0.5 RPS					Aération			
	1 RPS					Pression consigne (Kpa)	Mesures :		
	2 RPS						H_initiale(")	H_max(")	P_stabilisée(kPa)
	3 RPS					0,4			
	4 RPS					0,6			
Commentaire :						0,8			
S	0.5 RPS					1			
	1 RPS								
	2 RPS								
	3 RPS								
	4 RPS								
Commentaire :									

Le tableau 6 ci-dessus permet de saisir les mesures de manière manuscrites avant de les entrer dans la base de données. Les calculs à propos de la caractérisation des poudres sont expliqués plus haut et ceux à propos des mesures d'ensachage dans le banc de test réel seront explicités dans les paragraphes suivants.

Il est probable que ce protocole très complet qui permet de balayer l'ensemble des comportements connus des poudres dans ce type d'équipement cause des situations qui ne conviennent pas au produit testé. Par exemple, dans certaines circonstances la machine peut comprimer la poudre et créer une zone pâteuse qui empêchera la vis de tourner, auquel cas le programme de la machine affichera une erreur de type "couple". Dans d'autres cas, le

produit peut être tellement fluide que le sac sera trop rempli ce qui empêchera la vis de tourner, auquel cas soit le sac risque de déchirer. La vis peut alors se mettre en erreur comme trop remplie, ou encore provoquer un dégagement de poussière à l'extérieur du sac. Ces 2 erreurs possibles ne sont pas souhaitables et il importe de connaître, pour une poudre donnée, les paramètres d'ensachage qui causent les erreurs. C'est pour cela que lorsqu'une erreur de couple apparaît l'utilisateur doit noter un "-1" dans la case de l'essai et si c'est une erreur de sac trop rempli, un "-2". Ainsi, il devient très facile de voir quelles configurations du banc de test ne conviennent pas au produit testé pour les éviter lors de la création de la recette la plus optimale chez le client.

L'erreur codée "-2" liée au poids trop important pour le sac de test relève surtout de la capacité du sac utilisé pour les tests et non de la machine en elle-même ou la manipulation de la poudre. Bien que cette erreur ne soit pas réellement une erreur d'ensachage en soi, mais plutôt une limite du banc de tests standardisé, l'erreur codée "-1" relative au couple de la vis est bel et bien une erreur très importante à prendre en compte. En effet, selon les produits ils ne pourront pas s'écouler correctement avec une ouverture trop faible. Par exemple les produits qui ont une grande tendance à se compacter vont créer des grumeaux qui vont alors nuire au bon fonctionnement de la vis. Si celle-ci force trop, le produit risque alors d'être endommagé ou bien d'endommager l'ensacheuse. Il y a donc très peu de poudres testées qui peuvent être manipulées avec l'ouverture la plus petite, et certaines nécessitent même d'être manipulées en mode "Fine" avec l'ouverture moyenne et petite (M+S) uniquement, car l'erreur apparaît pour les deux autres ouvertures. Enfin, les erreurs de couple de la vis ont lieu plus souvent à haute vitesse, ce qui s'explique par le fait qu'à haute vitesse, la poudre va pouvoir se compacter encore plus vite qu'à basse vitesse et donc bloquer la vis très tôt. Il est très important de savoir pour quelles configurations la vis va se bloquer, car c'est un comportement qu'il faut absolument éviter. Chez le client, l'ensachage optimal est celui qui est le plus rapide et le plus précis. Il est donc important de savoir les configurations pour lesquelles l'ensachage ne peut pas se faire correctement ou du moins pas à chaque fois, et éviter absolument ces configurations, d'où l'importance de les coder en tant qu'erreurs.

Ainsi, un simple regard aux mesures d'une poudre peut indiquer à un gestionnaire produit les configurations à éviter absolument.

Pour s'affranchir de l'observation du poids du sac par l'ensacheuse, le test du remplissage se fait pendant 2 secondes pour chaque configuration. Cela permet d'observer le comportement de la poudre sur une base similaire pour toutes les configurations. À la suite de ce remplissage pendant 2 secondes, la quantité de poudre c'est-à-dire la masse du sac rempli est mesurée. Or selon les configurations le sac peut être rempli de plusieurs kilogrammes ou de seulement quelques dizaines de grammes. Pour avoir un indicateur de remplissage qui soit comparable entre les configurations de la machine, le flux de produit est calculé. Ce flux s'exprime en kg/s et représente donc la quantité de produit qui sera mise dans le sac en une seconde avec chaque paramétrage. Le choix des 2 secondes permet deux aspects pratiques :

- Pour les ouvertures faibles, la masse pesée reste mesurable par la balance industrielle disponible dans les halles de tests.
- Pour le paramétrage de la recette de tests, le temps n'a pas besoin d'être changé puisque le même temps est utilisé, quel que soit le mode de remplissage.

Néanmoins pour les ouvertures les plus larges (en mode aveugle) le temps aurait pu être réduit à 1 seconde pour s'adapter aux poudres les plus lourdes et ainsi éviter l'apparition d'une erreur de quantité dans le sac. En effet en 1 seconde au lieu de 2, le sac serait moins rempli et pour les poudres très fluides ou très lourdes l'erreur « -2 » n'apparaîtrait pas. Cette amélioration sera conseillée, mais dans le cadre de cette étude elle ne sera pas mise en place pour des raisons de praticité de l'utilisation de la machine et de son paramétrage pour les tests. Comme le changement des conditions machines est manuel, il est préférable que la durée d'ensachage reste fixée pour éviter les erreurs.

Enfin, les mesures effectuées sur la machine vont également permettre d'observer la stabilité du remplissage pour chaque paramétrage de la machine. La performance de l'ensachage est mesurée d'une part par sa cadence, mais aussi et surtout par sa précision,

comme cela a été dit plus haut. Il est en effet primordial pour le client de réaliser des sacs qui ont tous la même quantité de produit en masse. Il souhaite en effet vendre un produit conforme au poids annoncé, mais aussi ne pas dépasser cette valeur de manière non contrôlée ou abusive afin d'éviter une perte de produit. Un procédé peu précis force l'ensacheur à mettre plus de produit afin de respecter le poids annoncé. La situation idéale serait de pouvoir remplir le sac, vérifier le poids et retirer ou ajouter de la poudre pour adapter le poids à la cible. Cette solution est impossible, car bien trop lente, et c'est pourquoi une marge d'erreur est acceptée. Le poids annoncé et donc vendu est forcément respecté, mais peut être dépassé de quelques dizaines de grammes. La précision qui sera utilisée pour cette étude est la valeur de l'écart-type des 4 mesures effectuées pour chaque configuration de l'ensacheur. Si la poudre a un comportement stable pour ce paramétrage, l'écart-type sera faible, ce qui implique que la précision sera bonne. À l'inverse, si la poudre a un comportement plus chaotique l'écart-type sera assez élevé et donc la précision de l'ensachage sera moins bonne. En d'autres termes, la valeur qui sera étudiée par le programme et stockée dans la base de données est l'erreur relative à chaque paramétrage. Il s'agira donc de chercher l'erreur minimale pour obtenir la précision d'ensachage maximale. Néanmoins, durant tout le reste de ce document la "précision" d'ensachage fera référence à l'écart-type des 4 mesures d'ensachage pour chaque configuration machine, afin de ne pas confondre avec les codes d'erreurs éventuels. L'écart-type des mesures permet de définir la précision par rapport à la moyenne des mesures, pour chaque configuration, comme c'est actuellement fait par l'entreprise pour produire les rapports d'essais fournis au client.

Finalement, la mesure du comportement de la poudre dans la machine fournit 3 indicateurs, pour les 25 configurations machines définies plus haut : le flux de poudre moyen (en kg/s), la précision de remplissage (en kg sur la base de données, mais en grammes le reste du temps) et l'erreur ou non lors de l'ensachage (sous forme de chaînes de caractères dans la base de données, mais sous forme de code d'erreur chiffré ensuite). Le tableau suivant contient les cellules calculées à partir des mesures sur la machine de référence pour une poudre type. Chaque ligne représente une configuration différente de la machine (ouverture

et vitesse de la vis en révolution par seconde) et permet de noter le flux de matière, l'écart-type des mesures répétées et les erreurs éventuelles :

Tableau 7 : Indicateurs de performances de l'ensachage : flux, précision et erreurs

OUVERTURE (MM)	VITESSE (RPS)	FLUX (KG/S)	ECART- TYPE ± (KG)	ERREURS
120,7	4	2,61	0,07	Pas d'erreurs
	5	3,13	0,06	Pas d'erreurs
	6	3,88	0,12	Pas d'erreurs
	8	4,84	0,13	Pas d'erreurs
	9	5,35	0,06	Pas d'erreurs
63,5	4	2,48	0,03	Pas d'erreurs
	5	2,93	0,03	Pas d'erreurs
	6	3,33	0,02	Pas d'erreurs
	8	4,08	0,03	Pas d'erreurs
	9	4,29	0,18	Pas d'erreurs
57,15	0,5	0,93	0,12	Pas d'erreurs
	1	1,20	0,01	Pas d'erreurs
	2	1,77	0,01	Pas d'erreurs
	3	2,32	0,02	Pas d'erreurs
	4	2,51	0,18	Pas d'erreurs
31,75	0,5	0,31	0,07	Pas d'erreurs
	1	0,52	0,05	Pas d'erreurs
	2	0,88	0,03	Pas d'erreurs
	3	-0,50	0,00	Erreur couple

22,23	4	-0,50	0,00	Erreur couple
	0,5	-0,50	0,00	Erreur couple
	1	-0,50	0,00	Erreur couple
	2	-0,50	0,00	Erreur couple
	3	-0,50	0,00	Erreur couple
	4	-0,50	0,00	Erreur couple

Ce tableau est créé pour chaque poudre de manière automatique lorsque les mesures sont entrées dans les cases correspondantes. C'est ce tableau qui sera récupéré et étudié par le programme qui sera vu dans les prochaines parties. Ces données caractérisent entièrement le comportement d'une poudre dans l'ensacheuse.

Il est clairement visible dans ce tableau que lorsqu'une erreur est apparue durant l'ensachage, le flux possède une valeur négative. Cette valeur négative permet de repérer qu'une erreur s'est produite, et provient seulement de l'écriture d'une « -1 » ou « -2 » à la place d'un blanc pour la mesure de la masse correspondante. Elle n'a pas d'explication physique et est simplement un choix pour permettre à l'erreur d'être repérable facilement. De plus, la précision est forcée à 0 pour les configurations provoquant des erreurs afin de ne pas perturber le programme. Ce choix est fait pour éviter les erreurs de calcul de la formule de l'écart-type qui pourraient être mal interprétées par les programmes d'analyses et de prédictions des données.

1.5 ANALYSE DES CORRÉLATIONS ENTRE LES PROPRIÉTÉS

Les mesures qui ont été présentées et dont l'intérêt a été démontré permettent de définir les poudres de deux manières différentes : en tant que matériaux granulaires très fins qui ont

une rhéologie qui les caractérise et en tant que produit à ensacher, manipuler par un banc de tests grandeur réelle.

Chaque poudre est donc caractérisée de deux manières et il s'agit maintenant de savoir si le comportement rhéologique qui a été mesuré permet effectivement de déterminer le comportement de la poudre dans la machine. Pour cela, un outil facile à mettre en place est l'analyse des corrélations entre les propriétés. Cet outil prend la forme d'une matrice qui représente les corrélations linéaires c'est-à-dire les dépendances linéaires entre les différentes propriétés. Les six propriétés des poudres ainsi que les trois indices de performance de l'ensachage sont pris en compte. Les conditions d'ensachage à savoir l'ouverture de la vis et sa vitesse de rotation sont également prises en compte. Pour cette analyse, les 25 poudres de la base de données ont été utilisées.

L'analyse est effectuée grâce à la fonction « corrcoef » du module « Numpy » disponible dans Python [18,19]. Cette fonction permet, à partir du tableau des données dont les colonnes sont les propriétés à étudier, de créer le tableau des coefficients de corrélation de Pearson. Chaque coefficient de corrélation entre une propriété A et B est calculé par la formule suivante, où « Cov » désigne la matrice de covariance des variables A et B et « σ » leurs écarts-types.

$$r = \frac{Cov(A,B)}{\sigma_A * \sigma_B}$$

Le résultat sous forme de tableau a une taille de 11 colonnes et 11 lignes, avec une diagonale composée des « 1 » puisque chaque propriété est exactement corrélée avec elle-même. Comme ce tableau est assez grand, le Tableau 8 permet d'observer pour commencer la partie du tableau à propos des six propriétés caractéristiques des poudres.

Tableau 8 : Corrélations entre les six propriétés des poudres

	Angle de repos	Densité compactée	Densité en vrac	Ratio de Hausner	Écart-type de l'angle de repos	Ratio d'expansion	Perméabilité
Angle de repos	1	-0,29519	-0,35139	0,20595	-0,40832	-0,03737	-0,43593
Densité compactée	-0,29519	1	0,98632	-0,40301	-0,14477	0,18133	0,44059
Densité en vrac	-0,35139	0,98632	1	-0,52622	-0,15487	0,19309	0,46526
Hausner	0,20595 9	-0,40301	-0,52622	1	0,18746 5	-0,33111	-0,28697
Écart-type de l'angle de repos	-0,40832	-0,14477	-0,15487	0,18746 5	1	-0,14444	0,02974 7
Ratio d'expansion	-0,03737	0,18133 1	0,19309	-0,33111	-0,14444	1	0,43112 3
Perméabilité	-0,43593	0,44059 1	0,46526 8	-0,28697	0,02974 7	0,43112 3	1

Ce tableau montre les corrélations entre les propriétés des poudres qui sont mesurées par les protocoles et les appareils présentés dans les pages précédentes. Les coefficients calculés prennent une valeur entre -1 et 1 et c'est la valeur absolue de ces coefficients qui permet d'interpréter les corrélations. Par exemple, ce tableau montre que la densité en vrac

donne des informations sur la poudre qui sont 98.6%¹ les mêmes que la densité compactée puisque leur coefficient de corrélation linéaire est de 0.986. Ce résultat est surprenant au premier abord, d'autant plus que le ratio de Hausner qui est le ratio de ces deux propriétés est faiblement corrélé avec les deux densités. Ce premier résultat montre qu'il est suffisant de mesurer une seule des deux densités pour caractériser la poudre du point de vue de sa masse. Le choix se porte sur la densité compactée, car en observant les corrélations des deux densités avec les autres propriétés il apparaît que la densité en vrac est toujours un peu plus corrélée. Dans la suite de l'étude, la densité en vrac ne fera donc pas partie des propriétés définissant les poudres. De plus, la comparaison avec le ratio de Hausner montre que la capacité de la poudre à se compacter ou non est faiblement liée à sa masse volumique apparente.

De manière générale et en mettant de côté le cas des deux densités, ce tableau permet de remarquer que chaque propriété des poudres a quelques corrélations avec d'autres propriétés, mais que toutes ces corrélations sont faibles. En effet aucune ne dépasse 50%. Les corrélations calculées dans ce tableau sont toutes inférieures à 45 % lorsque la densité en vrac n'est pas prise en compte, ce qui permet de dire que ces six propriétés sont assez indépendantes pour être utilisées ensemble afin de définir pleinement une poudre. Par exemple, ce tableau montre que l'angle de repos donne des informations sur la poudre qui sont à 29 % les mêmes que celles données par la densité compactée. Une observation graphique permet de se rendre compte des corrélations calculées dans le tableau précédent, et ces graphiques sont disponibles dans la partie 2.2.2 car l'outil d'observation des données sera traité en partie 2.

La suite de cette analyse porte sur les configurations de la machine d'ensachage à savoir l'ouverture et la vitesse d'ensachage. Le tableau ci-dessous contient les coefficients de régression des paramètres de réglage de la machine ajoutés aux six propriétés des poudres.

¹ La notation en pourcentage est adoptée pour plus de lisibilité et comme les coefficients, en valeurs absolue, varient entre 0 et 1.

Pour une meilleure lisibilité, seules les deux colonnes dont on parle sont montrées, comme les corrélations entre les propriétés des poudres ont déjà été étudiées.

Tableau 9 : Corrélations des paramètres machines de l'ensachage

	<i>Ouverture</i>	<i>Vitesse</i>
<i>Ouverture</i>	1	0,633064
<i>Vitesse</i>	0,633064	1
<i>Angle de repos</i>	-1,5E-18	-3,7E-18
<i>Densité compactée</i>	2,96E-18	-4E-18
<i>Hausner</i>	7,52E-18	-7,9E-18
<i>Écart-type de l'angle de repos</i>	2,6E-19	3,86E-18
<i>Ratio d'expansion</i>	-8,8E-18	-5,5E-18
<i>Perméabilité</i>	-6,3E-18	-1,7E-17

Ce tableau permet de vérifier que les paramètres de la machine et les propriétés des poudres n'ont aucune corrélation puisque les coefficients calculés sont assimilables à 0. En revanche il est très intéressant de voir la corrélation entre l'ouverture et la vitesse d'ensachage. En effet ces deux éléments partagent 63 % des informations mesurées sur la poudre. Ce résultat est attendu, car les vitesses sont choisies en fonction des ouvertures dans le protocole : le mode de remplissage rapide se fait avec des ouvertures et des vitesses grandes alors que le remplissage de précision se fait avec des ouvertures et des vitesses plus faibles. Il est donc normal qu'il y ait une corrélation assez importante entre ces deux configurations bien qu'elles soient toutes les deux paramétrables indépendamment sur la machine.

Que ce soient les propriétés qui caractérisent la poudre ou bien les conditions de réglage de la machine, ces données vont être utilisées pour définir l'ensachage sur une poudre et

prédire la performance de la poudre à l'ensachage. Pour cela, observons les corrélations entre toutes ces propriétés et les performances d'ensachage à savoir le flux de poudre, la précision de remplissage et l'apparition d'une erreur.

Tableau 10 : Corrélations de l'ensachage avec les propriétés des poudres

	<i>Flux</i>	<i>Précision</i>	<i>Erreurs</i>
<i>Ouverture</i>	0,561862	0,164453	0,354758
<i>Vitesse</i>	0,518907	0,142289	0,087205
<i>Angle de repos</i>	-0,04545	-0,03225	0,006666
<i>Densité compactée</i>	0,130735	0,137104	-0,16222
<i>Hausner</i>	-0,05092	-0,04734	0,134677
<i>Écart-type de l'angle de repos</i>	0,200733	0,015971	0,130629
<i>Ration d'expansion</i>	0,029718	0,04098	-0,15772
<i>Perméabilité</i>	-0,04775	0,081572	-0,20524

Ce qui est marquant au premier regard est l'importance dominante de l'ouverture du système de remplissage de la machine. En effet comme cela a été vu dans le tableau 9, les cinq ouvertures utilisées sont très différentes ce qui crée une grande différence entre les ensachages faits pour des ouvertures différentes. Pour le flux et la précision, la vitesse de remplissage a également un impact important et ces résultats sont rassurants, car la vitesse et l'ouverture sont les deux paramètres réglables les plus importants de la machine et leur impact était donc supposé comme très important. Ces deux configurations sont donc clairement dominantes et essentielles pour l'estimation du flux de poudre dans la machine.

En ce qui concerne les propriétés de la poudre, les coefficients de régression linéaire montrent qu'une seule propriété ne suffirait pas à décrire leur ensachage dans la machine par une fonction linéaire. En effet les coefficients de corrélation linéaire sont assez faibles que

ce soit pour le flux, la précision ou les erreurs d'ensachages liées aux limitations de la machine. Il est intéressant de remarquer que l'angle de repos par exemple a un coefficient très faible pour les trois indicateurs de performances. Ceci peut s'expliquer par le fait que l'angle de repos est une mesure statique alors que dans la machine, la poudre est toujours en mouvement. De plus, la propriété qui a la plus grande corrélation avec le flux est la stabilité de l'angle de repos (calculée comme l'écart-type des mesures d'angle effectuées). La densité de la poudre, qui est au départ la seule propriété mesurée par l'entreprise, a une corrélation d'environ 13 % pour le flux et la précision. Ce résultat permet de dire que cette propriété n'est pas suffisante, et que les autres sont nécessaires pour décrire pleinement l'ensachage des poudres, et le faire de manière fiable. Enfin, notons le coefficient d'environ 20 % de corrélations entre le coefficient de perméabilité de la poudre et le code d'erreur. Le ratio d'expansion a lui aussi une petite corrélation avec les erreurs d'ensachage (15 % environ), ce qui justifie bien de prendre en compte ces paramètres d'aération de la poudre puisqu'ils promettent d'avoir un impact positif sur la prédiction.

L'impact des propriétés qui a été présenté est un impact linéaire et l'on peut se demander si les termes au carré, au cube ou les termes croisés auraient un impact sur l'ensachage. Ces termes ont été testés mais aucun n'a montré un impact digne d'intérêt, sauf la vitesse d'ensachage qui apporte un impact significatif si elle est élevée au carré et au cube. Ces deux termes seront ajoutés au modèle lors de la prédiction finale qui sera abordée à la section 3.3.1.

Finalement, cette analyse des corrélations montre que toutes les données vont être utiles pour prédire l'ensachage des poudres et qu'elles peuvent être considérées comme indépendantes dans un premier temps.

1.6 CONCLUSION

Les mesures des poudres, que ce soit leur caractérisation ou leur performance à l'ensachage, constituent la première phase du projet. Ce travail permet de valider le fait qu'il existe des mesures rapides et simples pour mesurer une petite quantité de poudre. Tout le travail réalisé conjointement avec les ingénieurs de Premier Tech a permis de montrer également que les propriétés des poudres peuvent être liées à leur performance dans un ensacheur industriel. Un modèle capable de prédire les performances dans un ensacheur permettrait d'éviter de faire des mesures dans une machine d'ensachage. Ces mesures sont très longues en temps et nécessitent beaucoup de produit ce qui explique la volonté de les supprimer du processus de vente d'un ensacheur.

De plus, l'analyse des corrélations entre les propriétés a montré d'une part que la mesure de la densité en vrac n'était pas nécessaire puisqu'elle est redondante avec la mesure de la densité compactée. D'autre part, elle a montré que les propriétés peuvent être considérées comme indépendantes pour définir le comportement macroscopique des poudres. Cette analyse a également montré que les six propriétés des poudres avaient de petites corrélations avec les indices de performance de l'ensachage ce qui justifie le fait d'utiliser plusieurs propriétés qui vont pouvoir se compléter pour améliorer les prédictions. Enfin, la vitesse de rotation de la vis et l'ouverture de remplissage sont les éléments qui ont le plus grand impact sur le flux, la précision et les erreurs d'ensachage. Ces résultats montrent donc que même si chaque poudre s'écoule différemment dans la machine, c'est le paramétrage de l'ensacheuse qui est prédominant au niveau de l'impact brut sur le flux et la précision de l'ensachage.

CHAPITRE 2

BASE DE DONNÉES ET ANALYSES

Comme il a été vu en première partie, les poudres sont mesurées de deux manières différentes pour essayer de lier ces deux comportements afin de prédire leur ensachage grâce à la mesure de leur rhéologie. Une fois ces mesures effectuées, il va alors être nécessaire de les stocker et de les traiter. Pour cela, une base de données est créée afin de disposer d'outils d'observation et d'analyse de toutes ces mesures. Premièrement, cette partie va présenter la création de la base de données et la manipulation des données pour définir les poudres, puis ces données seront observées pour en déduire des intervalles de variations. Grâce à une analyse des composantes principales, une observation globale des six propriétés des poudres sera effectuée. Enfin, le développement de différents outils va permettre de comparer les poudres, de trouver les similarités entre elles et d'en déduire des tendances dans leurs performances d'ensachage.

2.1 CRÉATION DE LA BASE DE DONNÉES

Cette section présente en détails la conception de la base de données et la manipulation des données qui est appliquée à chaque étape. Cette section est particulièrement utile au lecteur qui souhaiterait poursuivre le développement de ces méthodes mais peut être passée rapidement par le lecteur qui souhaite simplement comprendre le fonctionnement de la base de données.

2.1.1 Stockage des données

Lors de la définition de ce projet autour du comportement des poudres, il est apparu nécessaire de mettre en place une base de données pour stocker les poudres testées. Ainsi, il

serait alors possible de comparer les nouveaux produits testés à ceux qui ont déjà été testés et dont le comportement est connu.

Un tableau est donc créé pour recueillir toutes ces données. Le choix d'Excel par rapport à un système de gestion de bases de données par exemple comme MS Access ou le langage SQL repose sur plusieurs points :

- Le tableau Excel est plus facile à remplir et plus visuel qu'un formulaire Access, et les données restent visibles et modifiables facilement contrairement aux systèmes sous SQL comme SQLite ou MySQL
- L'entrée des données peut être faite aisément par n'importe qui, puisque les formations sur Excel sont bien plus courantes que sur les autres outils cités.
- Excel est utilisable facilement de concert avec le langage python, tant pour l'importation que pour l'exportation des données

Ce fichier de base de données contient donc une feuille pour chaque poudre mesurée ainsi qu'une feuille vierge d'exemple (à copier pour tout nouvel ajout de poudre) et une feuille qui assure la récupération des indices évoqués précédemment (les flux moyens, les précisions et les erreurs) dans un tableau qui sera lu aisément par le langage Python. Le tableau 7 qui décrit les 25 mesures de l'ensachage pour une poudre (1 mesure d'ensachage pour les 5 vitesses et pour les 5 ouvertures) dans la feuille de chaque produit est récupéré par cette feuille de lien pour le transformer en ligne. Ainsi dans la feuille de résumé des mesures qui est lue par python et dont l'illustration est faite à la figure 12, une ligne correspond à une poudre et donc les indices mesurés c'est-à-dire les 25 flux, les 25 précisions et les 25 erreurs sont rangés le long de la ligne définissant chaque poudre, avec une colonne pour chaque paramétrage.

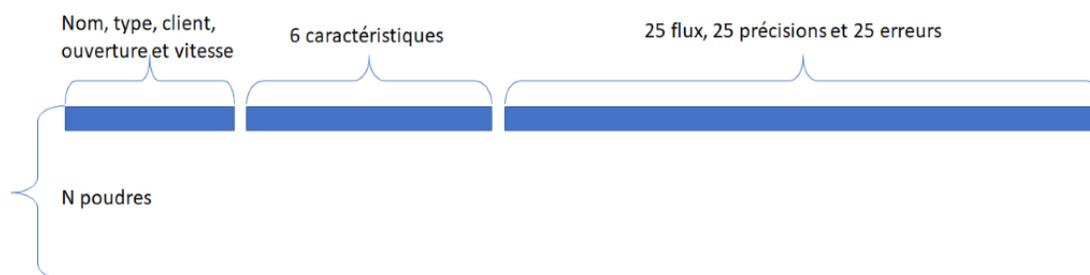


Figure 12 : Schéma de la construction du tableau des données résumées par poudre

Ce tableau permet une mise en forme simple des données, plus lisible que la séparation en différentes feuilles et donc facilement exportable vers d'autres programmes. Il contient autant de lignes que de poudres (nombre que l'on va noter N pour la suite) dans la base de données et 90 colonnes, dont 75 qui sont les données de comportement dans la machine (flux, précision et erreur pour 25 configurations de la machine).

Afin de récupérer les données depuis chaque feuille caractérisant chaque poudre vers la feuille de résumé, il est primordial que les feuilles qui définissent chaque poudre gardent la même structure. En effet, les fonctions qui récupèrent les données calculées cherchent la case d'un tableau de valeurs via son numéro de ligne et de colonne. Si la structure de la feuille caractérisant la poudre est modifiée, alors la récupération ne sera plus correctement effectuée. De plus, dans le but d'automatiser le plus possible les calculs, toutes les fonctions sont écrites et une ligne d'exemple est protégée afin de ne pas pouvoir perdre les formules fonctionnelles. Un aperçu des fonctions utilisées et de leur intérêt est présenté en annexe II pour le lecteur qui aimerait connaître les détails de la récupération automatique des données sur la feuille de résumé.

Le schéma de la figure 13 montre le processus de manipulation et de transfert des données. Les mesures brutes qui sont effectuées sur chaque produit sont entrées dans la feuille de caractérisation unique de cette poudre, ce qui permet de calculer ses indicateurs de caractéristiques et de performances. Ces derniers sont alors mis en forme pour être exportés

facilement sous forme de tableau. Une fois le tableau importé par le programme, celui-ci les remet en forme afin de former un tableau qui sera utilisé pour toutes les analyses.

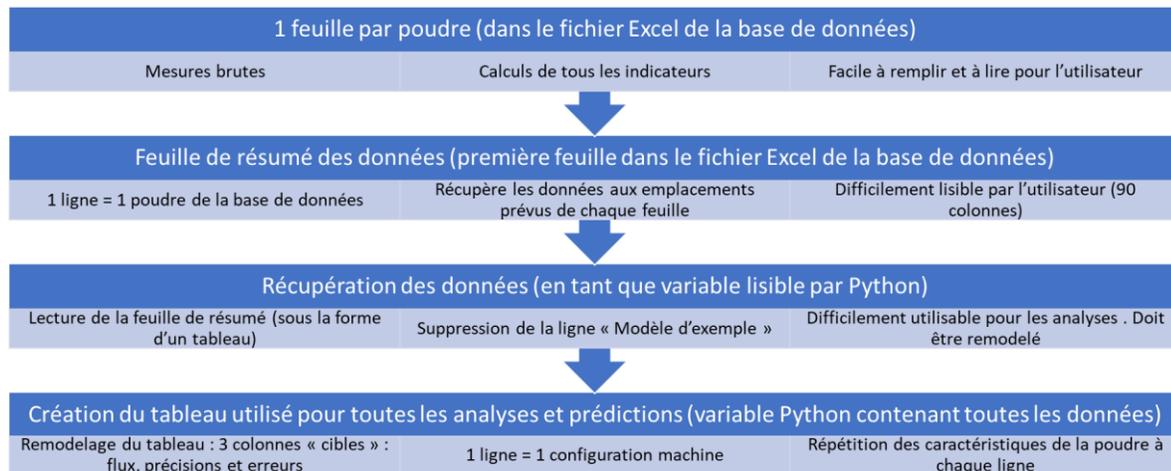


Figure 13 : Processus de manipulation des données par le tableur puis l'application

2.1.2 Liens entre la base de données et le programme qui les manipule

Dans les scripts et les fonctions codées sous Python qui ont été développées, le module principal qui effectue le lien entre la base de données sous forme de tableau et les fichiers de code (codés en langage Python, ces fichiers portent l'extension « .py ») est la librairie "Pandas" [20]. Cette librairie permet la gestion des tableaux sous forme de dictionnaires. Cela permet de manipuler des tableaux comme des bases de données possédant des attributs. Il est donc possible de les trier, d'en sélectionner une partie selon leur valeur, leur position ou un ensemble de conditions comme il serait possible de le faire avec des requêtes SQL.

L'intérêt de l'utilisation du module "Pandas" réside dans sa facilité d'utilisation. La fonction "read_excel" permet de lire directement la première feuille d'un fichier Excel en tant que dictionnaire. Les données sont donc très facilement importées et directement utilisables. Un dictionnaire est un tableau de valeurs contenant des en-têtes et des index pour permettre de manipuler les données en utilisant les noms des colonnes ou des lignes les

définissant et non simplement leurs numéros. Dans le dictionnaire récupéré, les données sont présentées exactement de la même manière que dans le tableau de la feuille de résumé. Ce premier rangement des données permet une importation simple que le module Pandas gère parfaitement. Pourtant ce n'est qu'un dictionnaire temporaire puisque dans cet état, les données ne sont pas utilisables facilement. Le rangement des données dans ce dictionnaire permet de simplifier l'importation, mais les différentes valeurs « cible » des performances d'ensachage sont rangées dans des colonnes différentes. Pour effectuer les analyses, il est nécessaire de disposer des données rangées dans des vecteurs colonnes Y1, Y2 et Y3 comme expliqué dans les paragraphes suivant et illustré par la figure 14.

Comme il est expliqué dans le schéma précédent, le programme créé spécialement pour ce projet comporte une fonction de manipulation des données qui va permettre de former un nouveau tableau, celui qui sera finalement utilisé dans toutes les analyses qui seront développées dans les pages précédentes.

La première fonction de l'application qui gère les données s'occupe de redimensionner ce tableau de mesures, contenant N poudres : le tableau Nx90 est lu afin d'extraire les données pour redimensionner les 75 colonnes en seulement 3 colonnes c'est-à-dire le flux, la précision et le code d'erreur. Ainsi, ce tableau va contenir 25 lignes pour chaque poudre, soit un nombre de lignes total de $25*N$. À ce tableau sont ajoutées les colonnes qui définissent chaque poudre grâce à leurs caractéristiques c'est-à-dire l'angle de repos, la densité compactée, le ratio de Hausner et les coefficients d'aération c'est-à-dire 6 colonnes. Comme ces 6 colonnes définissent une poudre, elles contiennent les propriétés d'une poudre où chaque ligne correspond à une configuration machine. Comme il y a 25 configurations dans lesquelles chaque poudre est testée, les propriétés des poudres sont répétées sur les 25 lignes qui lui correspondent. Finalement, en ajoutant l'index du tableau qui est l'ouverture de remplissage et une colonne pour stocker la vitesse utilisée pour chaque essai, le tableau final a une taille de $25*N$ lignes et $3+6+2$ soit 11 colonnes (3 colonnes pour les performances d'ensachage, 6 colonnes pour les propriétés et 2 pour les paramètres de la machine). C'est ce tableau qui sera utilisé pour effectuer toutes les analyses. De plus, le même tableau est

dupliqué pour y ajouter les colonnes des noms de chaque poudre et leur type afin de pouvoir faire les liens avec l’affichage sur les tableaux et les graphiques de l’application.

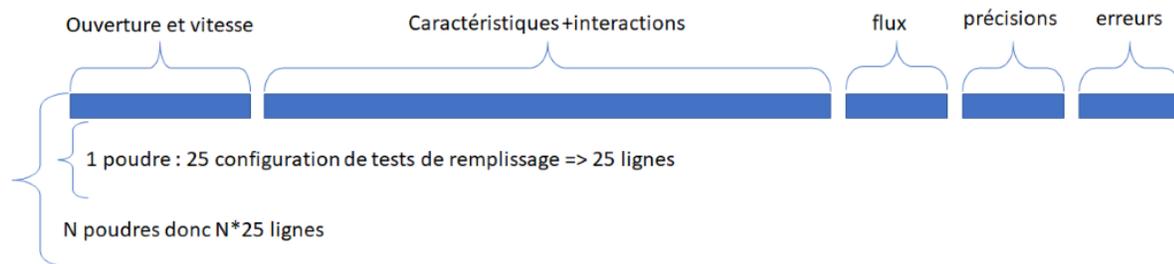


Figure 14 : Schéma de la structure du tableau des données après manipulations

Ce tableau, qui sera appelé « All Data » par la suite est de la forme suivante, pour chaque ligne c’est-à-dire chaque poudre connue :

$[O, V$ (*Configuration machine*) X_1 à X_6 (*rhéologie*) Y_1, Y_2, Y_3 (*performances d'ensachage*)]

Cette forme de tableau va permettre de comparer facilement la poudre X (où i va de 1 à 6 pour les 6 propriétés des poudres) et sa performance à l’ensachage Y (où i va de 1 à 3 pour représenter le flux, la précision ou le code d’erreur).

2.1.3 Création de la matrice X des poudres

Une poudre n’est pas définie par une seule caractéristique et comme cela a été montré par l’analyse des corrélations, il est important de prendre en compte les 6 indicateurs rhéologiques calculés à partir des mesures en laboratoire. Cette analyse a également montré que ces propriétés étaient faiblement corrélées et pour l’instant elles seront donc considérées comme indépendantes. La structure du tableau remodelé présenté précédemment contient une matrice X et une matrice Y qui peuvent être extraits pour les analyses. Il s’agit dans le paragraphe suivant de clarifier le contenu de la matrice X qui ne contient pas exactement les propriétés des poudres, mais ces propriétés normalisées.

Rappelons que les poudres sont caractérisées par six propriétés : l'angle de repos, la stabilité de cet angle, la densité compactée, le ratio de Hausner, le ratio d'expansion et le coefficient de perméabilité. Ces six propriétés évoluent dans des intervalles de valeurs bien différents et il n'est pas souhaitable que les différences d'échelles influent sur les analyses ou les résultats des prédictions. Ainsi, pour supprimer l'influence des échelles de chaque propriété, il faut appliquer une fonction de normalisation. Cette fonction va permettre d'exprimer toutes les mesures entre 0 et 1, tout en gardant leurs variations. Afin de réaliser cette étape, de nombreux modules contiennent une fonction de normalisation, et celle qui est utilisée ici est celle du module "scikit-learn" (sklearn en abrégé et dans l'interpréteur Python), sous-module "preprocessing". Le module "scikit-learn" [21] est un module qui contient une multitude d'outils d'analyses de données et de prédictions destinées spécifiquement aux scientifiques de la communauté Python. Cet outil permet de normaliser toutes les propriétés sur l'ensemble des poudres présentes dans la base de données via la fonction « normalize ». Le vecteur X_n , contenant les six propriétés normalisées, c'est-à-dire exprimés entre 0 et 1 en respectant leur variance, et les paramètres de réglages de la machine d'ensilage a donc la forme suivante, pour une poudre et une configuration machine (donnée par le couple de valeurs (O, V), l'ouverture et la vitesse d'ensilage) :

$$X_{n \text{ configuration,1 poudre}} = [O \ V \ X_{1n} \ X_{2n} \ X_{3n} \ X_{4n} \ X_{5n} \ X_{6n}]$$

Les fichiers de codes qui gèrent, analysent et manipulent les données issues du fichier de la base de données utilisent quelques outils disponibles via des librairies Python. À chaque fois qu'un outil est présenté, la bibliothèque est citée et l'algorithme de son utilisation est présenté sous forme d'étapes. Les fichiers de code Python ne seront pas fournis compte tenu de leur taille (environ une centaine de lignes par fichier), mais un tableau récapitule toutes les fonctions utilisées en annexe III. De plus, le processus complet de l'étude d'une poudre par l'application est repris en annexe IV.

Dans le but de rendre la manipulation des données et de manière générale toutes les analyses accessibles à n'importe quelle personne sans forcément avoir besoin de manipuler Python, un tableur ou n'importe quel outil d'analyse, un outil d'affichage est créé en parallèle

des études et permet de lancer et d'observer les résultats. Cette interface utilisateur est créée à partir de Python et permet d'effectuer toutes les analyses qui ont été et seront présentés dans ce mémoire. Sa création en détails est présentée en annexe VI.

2.2 OBSERVATION DES INTERVALLES — CONTRAT DE PERFORMANCES

Avant de plonger dans les outils d'analyse des données et l'application qui permet de les utiliser, il est intéressant de faire un retour sur le tableau de la base de données pour observer les mesures obtenues. Dans cette partie il s'agit simplement de tracer les données récoltées les unes par rapport aux autres afin de répondre à plusieurs questions :

- Peut-on observer des tendances entre les propriétés mesurées en plus de ce qui a été observé avec l'étude des corrélations ?
- Peut-on observer des tendances de l'impact des caractéristiques sur les performances à l'ensachage ?
- Où se situent certaines poudres choisies par rapport aux autres, et ce pour tous les indicateurs disponibles ?
- Comment définir un intervalle sur les caractéristiques des poudres permettant de garantir les performances dans la machine de ces poudres potentielles ?

2.2.1 Création et mise à jour du fichier

Premièrement il s'agit de créer un nouveau fichier de tableur pour observer ces données. Le tableau de résumé des indicateurs rhéologiques et de performances dont la construction est expliquée en 2.1.1 est copié dans 2 feuilles différentes du même fichier. Une fois ce fichier créé, il s'agira à chaque ajout d'une nouvelle poudre dans la base de données

de copier la ou les lignes supplémentaires à la fin du tableau de ce fichier d'observation pour le mettre à jour. Le fichier d'observation contient donc 2 tableaux : l'un va servir de référence globale, car il contiendra toutes les poudres connues et l'autre contiendra également toutes les poudres connues, mais celui-ci sera utilisé pour trier les poudres à observer. Grâce à la mise en forme en tant que tableau, il est en effet possible de trier les lignes qui sont affichées en fonction des valeurs voulues dans les colonnes disponibles. Ainsi il sera possible de ne choisir qu'un seul client par exemple, ou un type de poudres, ou encore seulement les poudres ayant un angle de repos supérieur à 50, etc. Les possibilités de tri ne sont limitées qu'aux données existantes et à l'imagination de l'utilisateur.

Dans le but de faciliter la compréhension du lecteur et de ne pas surcharger ce document avec des exemples réels difficilement lisibles, le schéma suivant décrit la structure du fichier d'observation des données. Ce schéma illustre la forme des structures des tableaux des paragraphes précédents.

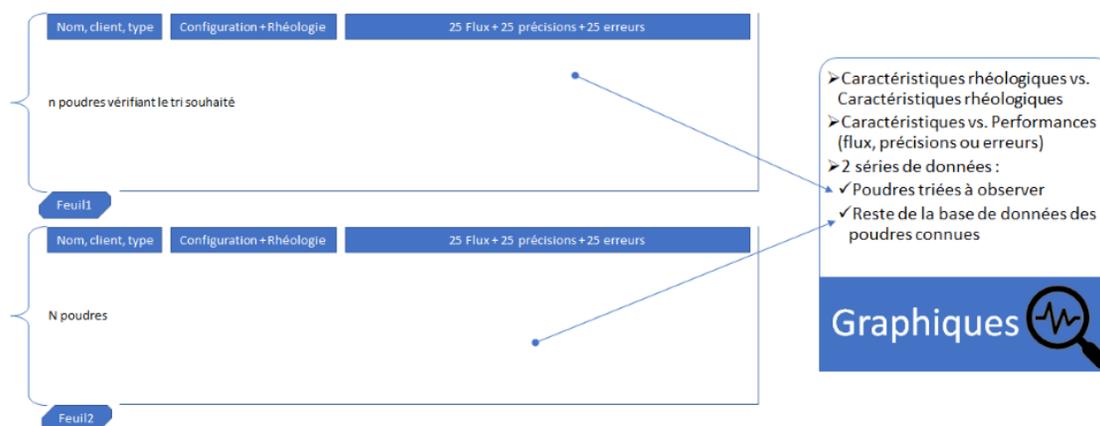


Figure 15 : Structure des tableaux et des graphiques d'observation des poudres

2.2.2 Observation des caractéristiques

Grâce à ce fichier, il est possible de tracer des graphiques comme ceux présentés ci-dessous, qui permettent d'observer les impacts de chaque caractéristique sur les autres. Le premier but de ces graphiques est de pouvoir comparer l'ensemble des poudres de la base de

données à un groupe sélectionné. Ce groupe peut être un type de poudre, un fabricant, une propriété en particulier ou n'importe quelle sélection souhaitée. L'intérêt est d'observer visuellement les propriétés ou le comportement à l'ensachage de la sélection par rapport aux autres poudres et pour cela deux couleurs seront utilisées dans les graphiques qui suivent. La terminologie employée est en anglais, car c'était le souhait de l'entreprise que la base de données et les outils soient développés en anglais pour permettre leur partage, à terme, à l'international dans leurs autres usines.

Le but premier des graphiques de la Figure 16 n'est pas d'observer les corrélations entre les propriétés, mais ils permettent d'illustrer les résultats obtenus en 1.5. Les points orange représentent toutes les poudres de la base de données et les points mauves la sélection des quelques poudres que l'on souhaite comparer aux autres, ici ce sont les poudres de gommes alimentaires.

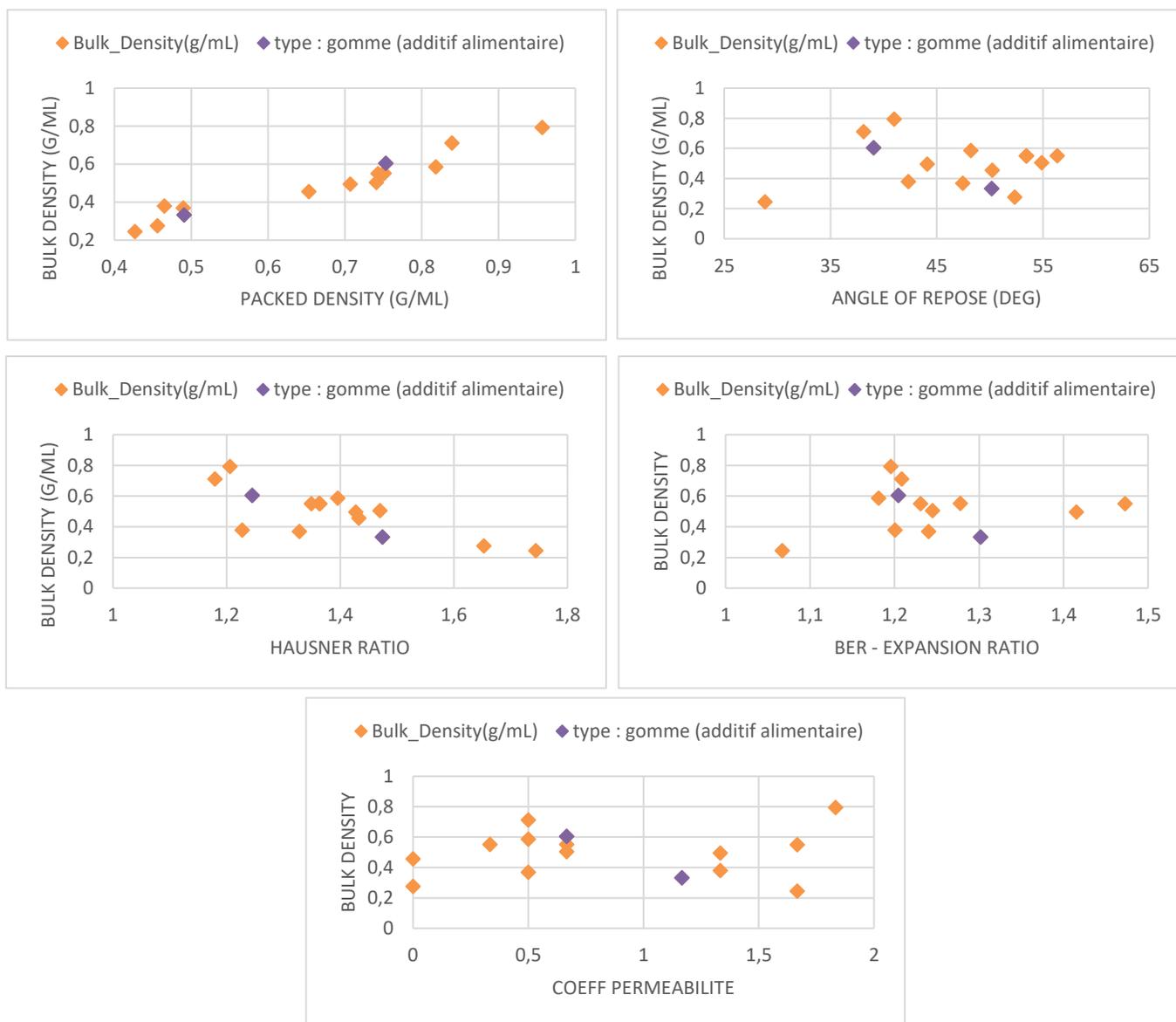


Figure 16 : Graphiques d'observation croisée des caractéristiques des poudres

Le premier graphique montre la forte corrélation entre la densité compactée et la densité en vrac, comme cela a été observé lors de l'analyse des corrélations (plus de 98 % de corrélation). Il est donc inutile d'utiliser ces 2 mesures pour caractériser une poudre : il est préférable d'utiliser une seule densité, mais de prendre en compte le ratio de Hausner qui représente le coefficient de compressibilité de la poudre. De plus les trois autres tracés

montrent qu'aucune tendance n'apparaît entre la densité en vrac et les trois autres caractéristiques qui sont ici l'angle de repos, le ratio d'expansion (BER) et le coefficient de perméabilité. Dans l'étude des corrélations entre les propriétés, il a été montré qu'elles n'étaient pas corrélées linéairement et ces graphiques de la figure 16 le confirment.

De plus, l'avantage de ce fichier d'observation est de comparer les caractéristiques d'une partie des poudres connues par rapport au reste : ici ce sont les gommés utilisés en tant qu'additifs alimentaires qui permettent d'illustrer ce propos. Il est possible d'observer en effet que ces deux poudres sont assez différentes l'une de l'autre, mais que néanmoins, ces gommés se situent plutôt parmi celles ayant :

- Une densité autour de la moyenne
- Un angle de repos autour de la moyenne
- Un ratio de Hausner moyen
- Un coefficient de perméabilité moyen voir faible
- Un ratio d'expansion plutôt faible

Même si ces deux poudres sont assez différentes, il est possible de conclure de ces observations qu'elles peuvent être considérées comme étant assez faciles à ensacher. Communément, les poudres situées au centre des graphiques sont les plus faciles à ensacher puisqu'elles sont situées là où la densité de points est la plus importante. Or, même s'il est possible d'obtenir de très bonnes performances d'ensachage pour les deux, il est important de noter que les recettes ne seront très probablement pas les mêmes étant donné les différences entre ces deux poudres.

2.2.3 Observation des flux

Les graphiques de ce fichier permettent de comparer les caractéristiques entre elles et d'observer la position des poudres d'intérêt par rapport aux autres. Il est donc intéressant d'observer directement l'impact de leurs caractéristiques rhéologiques sur le flux d'ensachage. Les 6 graphiques de la Figure 17 montrent le flux de poudre en fonction de la propriété étudiée, pour chacune des six propriétés caractéristiques définissant les poudres. Le flux observé ici est celui pour une ouverture maximale (petite, moyenne et grande cumulée) de l'ensacheuse et pour une vitesse de la vis de 8 rotations par seconde.

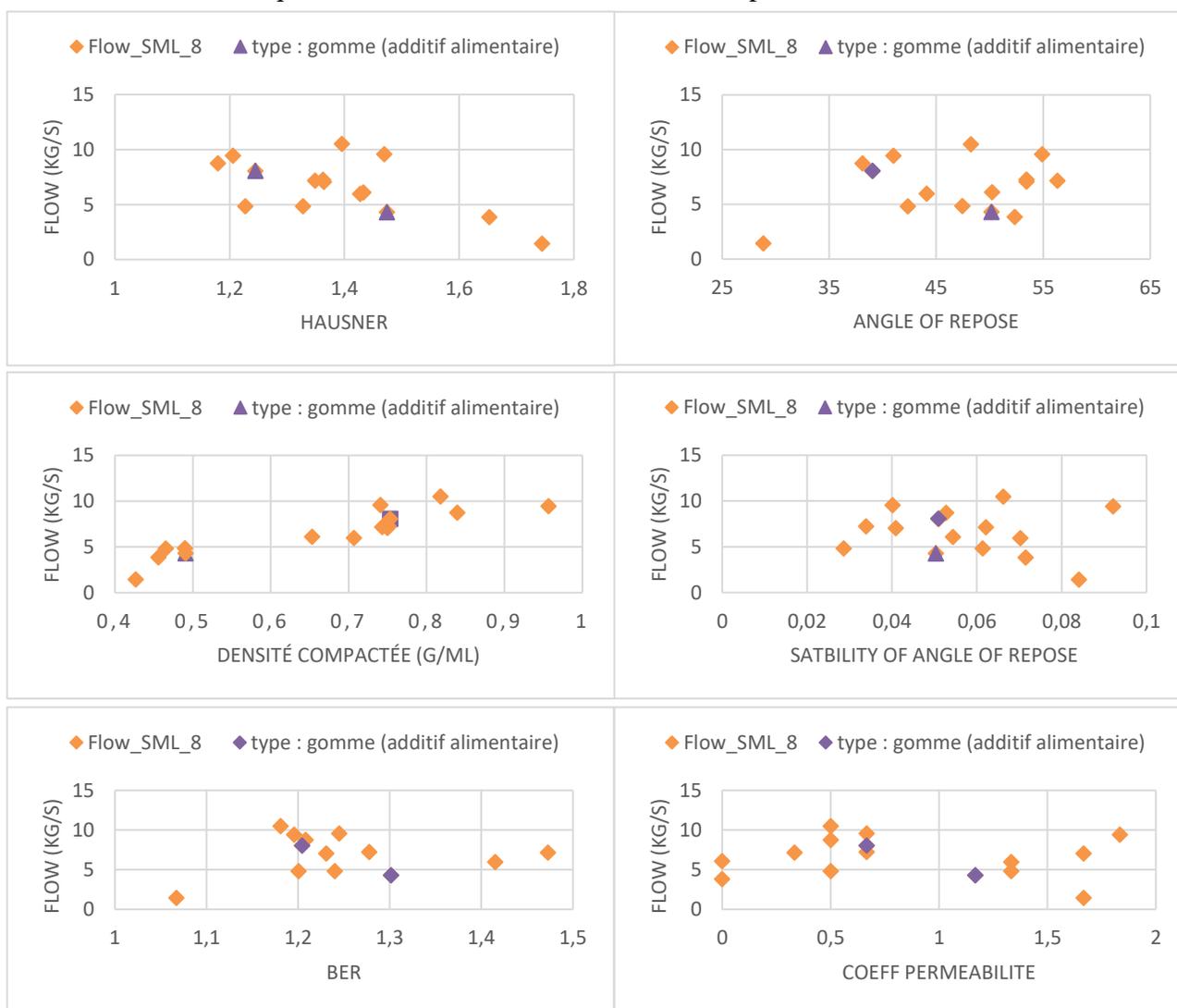


Figure 17 : Graphiques d'observation du flux en fonction des caractéristiques

La première chose qui est visible sur l'ensemble de ces graphiques est le fait que pour chaque caractéristique, les flux sont représentés par un schéma différent. De plus, un intérêt particulier doit être porté à l'impact de la densité compactée de la poudre sur le flux : la répartition des points forme une tendance linéaire. Cette observation concorde avec la corrélation de 13 % entre la densité et le flux, obtenue dans la partie 1.5. Lors de l'analyse des corrélations, la stabilité de l'angle de repos (exprimée par l'écart-type de ses neuf mesures) a un impact de 20 % sur le flux. Cela peut être observé sur le graphique, car les points sont bien regroupés, même si la tendance est plus poché d'une courbe que d'une droite. Pour les autres caractéristiques, il est assez difficile de prévoir un comportement qui serait expliqué par une fonction, polynomiale ou logarithmique par exemple. En effet les caractéristiques n'ont pas un impact très franc sur le flux de poudre : les graphiques contiennent pour la plupart un nuage de points épars au centre, et ce comportement a plusieurs explications.

Premièrement, les poudres testées sont souvent proches dans leur comportement macroscopique. En effet ces produits ont déjà été sélectionnés pour être ensachés dans ce type de machine. Ce sont des produits qui ont souvent posé des problèmes lors de leur ensachage et qui ont donc été stockés après leur étude pour les garder en tant qu'exemple. Donc bien qu'ils soient différents dans leurs comportements rhéologiques, ils restent tous dans les mêmes gammes de flux.

Deuxièmement, les poudres sont des produits très complexes et il est possible que pour deux poudres foncièrement différentes dans leur comportement dans la machine, certaines propriétés de leur rhéologie se ressemblent. Ainsi, il s'avère donc difficile de dégager un comportement global des poudres par la seule observation des caractéristiques prises une à une.

Pour former une fonction de prédiction mathématique du comportement des poudres, il faudra donc prendre en compte toutes les propriétés des poudres puisqu'individuellement, aucune tendance claire n'apparaît. Ce sujet sera étoffé dans la partie 3 à propos des méthodes de prédictions et des solutions qui ont été adoptées.

Le flux n'est pas le seul indicateur de la performance de la poudre à être ensachée puisque la précision est aussi importante. Un troisième indicateur, la présence d'erreurs d'ensachage, permet également de conclure sur l'ensachage d'une poudre dans cette machine. Ces deux indicateurs peuvent être observés de la même manière et les graphiques correspondants sont fournis en annexe V pour le lecteur curieux, car leur observation ne permettait pas d'analyses supplémentaires.

2.2.4 Utilité industrielle de ces comparaisons

Les graphiques présentés le sont à titre d'exemple : ici seules les poudres de type gomme alimentaire sont comparées aux autres, et seuls certains graphiques sont pris comme exemple pour ne pas surcharger la lecture tout en permettant de comprendre la méthode de comparaison utilisée. Le fichier complet permet des tris plus complets et possède bien plus de graphiques pour observer toutes les performances en fonction de toutes les caractéristiques.

Précédemment, il a donc été montré que l'observation des graphiques peut donner de très bonnes indications sur le comportement des poudres les unes par rapport aux autres, que ce soit en observant leurs caractéristiques en fonction d'une autre ou bien les performances à l'ensachage en fonction des caractéristiques. Ainsi, il est possible de comparer le comportement des gommes alimentaires et de voir qu'elles se situent dans la zone des poudres les plus ensachées sur tous les graphiques.

Lorsque les graphiques sont étudiés en détail et que les données sont recoupées, il est possible d'observer les intervalles dans lesquelles évoluent ces poudres et éventuellement d'extrapoler ces intervalles. Cette étude rapide et semi-qualitative permet par exemple de définir des intervalles de performances en se basant sur les mesures normalisées des caractéristiques choisies. Par conséquent il est possible grâce à ces graphiques de définir des intervalles précis pour des contrats de performances par exemple. En effet si seulement

quelques poudres ont été testées dans le banc de test d'ensachage et que l'ensacheuse vendue sert à manipuler d'autres poudres, le contrat de performances peut donner les intervalles des caractéristiques dans lesquelles la performance (vitesse et précision) d'ensachage sera bonne tout en précisant qu'à l'extérieur de cet intervalle les performances ne sont plus garanties. C'est pourquoi l'étude des mesures via tous ces graphiques est utile : l'entreprise peut se protéger quant aux performances promises en fonction des poudres qui ont été testées, ce qui solidifie ses contrats et appuie sa connaissance profonde de la manipulation des poudres.

2.3 COMPARAISON DES POUDRES ENTRE ELLES

Une première analyse qualitative basée sur une observation graphique croisée des données a été présentée précédemment. Dans cette partie il va s'agir d'utiliser les données sur les poudres pour les comparer entre elles en fonction de leurs caractéristiques rhéologiques.

Dans un premier temps, l'analyse est qualitative, car l'expérience de l'entreprise nous montre que la comparaison de deux poudres permet d'élaguer un bon nombre de questions qui resteraient sinon sans réponses. Par exemple si une poudre inconnue s'avère être très similaire dans son comportement apparent à une autre poudre qui a déjà été étudiée, alors la nouvelle poudre est testée aux alentours de la recette connue et fonctionnelle pour l'autre. En effet, l'hypothèse qui suppose que deux poudres ayant un comportement similaire vont s'ensacher de manière similaire est vérifiée par les années d'expérience des ingénieurs de l'entreprise. Néanmoins, aucune mesure précise ou normalisée n'était effectuée auparavant et cette comparaison était faite de manière plus sensorielle et donc qualitative, et ce sans stocker les données de manière rigoureuse.

Grâce aux mesures qui ont été récoltées et au remplissage progressif de la base de données, il va être possible de comparer les poudres sur des indices quantifiés. La

comparaison sera donc bien plus robuste et fiable. Deux comparaisons présentent un intérêt afin de connaître le positionnement réel de la poudre :

- Position de la poudre à étudier par rapport à toutes les autres (toute la base de données)
- 7 Poudres les plus ressemblantes à la poudre à étudier d'après leurs mesures rhéologiques, et le pourcentage de ressemblance par rapport à la poudre à étudier.

Ces deux comparaisons font partie de l'analyse de la poudre à étudier à deux niveaux différents. Le premier niveau est assez global puisque la comparaison est faite par rapport à toutes les autres poudres connues. Le second niveau en revanche permet de connaître beaucoup plus précisément la poudre qui est inconnue grâce à la connaissance des produits qui se comportent de la même manière.

Ces deux niveaux de comparaison vont être présentés dans les paragraphes suivants. Il est important de garder à l'esprit que ces deux comparaisons sont complémentaires, car elles n'interviennent pas exactement aux mêmes niveaux d'analyse.

Tous ces outils permettent de comparer une poudre à étudier définie par ses caractéristiques rhéologiques. Comme cela a été présenté dans les pages précédentes, la saisie des données est facilitée, mais le processus à suivre avant de pouvoir lancer l'analyse est le suivant illustré à la Figure 18.



Figure 18 : Processus nécessaire à l'étude d'une poudre inconnue grâce à l'application

2.3.1 Carte d'observation de l'ensemble des poudres

Le but d'une comparaison est de trouver des poudres ressemblantes ou au contraire de connaître celles dont le comportement est totalement différent. Ce premier outil d'analyse va permettre d'observer le comportement général de chaque poudre par rapport à toutes celles qui sont connues et donc qui peuplent la base de données. Le meilleur outil dans ce cas-là est un outil très visuel et qui permet une comparaison très simple dans un premier temps. Cet outil va prendre la forme d'une carte : sur un graphique en nuage de point, chaque poudre va être représentée par un point en fonction de ses caractéristiques rhéologiques. Cette carte montre donc la répartition des poudres dans leur ensemble de variabilité. Cette carte affiche les poudres ressemblantes proches les unes des autres et les poudres les plus différentes vers les extrémités du graphique. Elle permet donc d'observer l'emplacement d'une poudre inconnue par rapport à l'ensemble de la base de données.

A. Tracé de l'ensemble des poudres connues

Cet outil prend donc la forme d'un nuage de points, où chaque point est une poudre connue du fichier des données. La poudre inconnue est affichée grâce à une forme différente : un losange afin de la reconnaître au premier coup d'œil. Or il a été vu dans les parties précédentes que la rhéologie d'une poudre était caractérisée par un vecteur de 6 valeurs. De plus, la partie précédente a montré que l'observation graphique de toutes ces données n'est pas aisée et qu'elle demande de nombreux graphiques ainsi qu'un long temps d'analyse par celui qui souhaite comparer les différentes poudres. Ainsi cette carte est tracée en tenant compte uniquement des caractéristiques rhéologiques mesurées dans le laboratoire dédié. Il s'agit donc de réduire la dimension des vecteurs définissant les poudres par six propriétés à seulement deux afin de pouvoir positionner chaque poudre dans un repère graphique 2D. Cette réduction de la dimension des poudres doit être faite en respectant la variance des propriétés des poudres pour perdre le moins d'informations possible.

B. Réduction de la dimension de la caractérisation

Pour réduire la dimension d'un ensemble de données, une solution consiste à passer par une analyse des composants principaux (PCA en anglais, pour « Principal Component Analysis »). Cet outil fonctionne de la manière suivante : le tableau des propriétés mesurées sur les N poudres est récupéré et ses données vont être transformées. Ce tableau est celui présenté en partie 2.1.2 et se présente par une ligne pour chaque poudre et une colonne pour chaque caractéristique, il contient donc les 6 propriétés des poudres normalisées.

La transformation du tableau X passe par le calcul de la matrice de covariance du tableau, qui est une matrice de taille 6x6 et qui contient les covariances entre chaque propriété dans la case correspondante. Comme la covariance entre X_1 et X_2 est égale à la covariance entre X_2 et X_1 et que la diagonale de la matrice vaut 1, la matrice est symétrique par sa diagonale. Cette matrice, qui est nommée S, sert de base au calcul des composants principaux. Il s'agit de représenter cette matrice sous une base orthogonale, car pour l'instant, les propriétés des poudres ne sont pas exactement indépendantes comme l'a montré l'analyse des corrélations. Par la recherche des valeurs propres (notées λ) de la matrice, il est possible de trouver les vecteurs propres associés à chaque valeur propre (notés V_λ) de cette matrice. Ces vecteurs sont orthogonaux entre eux et sont formés à partir de combinaisons linéaires entre les vecteurs de base c'est-à-dire une combinaison linéaire des propriétés caractéristiques de la rhéologie des poudres. Les équations suivantes permettent d'obtenir ces éléments, avec I la matrice identité et « || » l'opérateur du déterminant d'une matrice. +

$$\text{les valeurs propres } \lambda \text{ vérifient l'équation } |S - \lambda I| = 0$$

$$\text{les vecteurs propres } V \text{ vérifient l'équation } (S - \lambda I)V_\lambda = 0$$

Ensuite, la matrice V formée par les vecteurs V_λ est utilisée pour transformer les mesures des propriétés des poudres dans la nouvelle base, pour créer Z, la nouvelle matrice

définissant les poudres dans la base des vecteurs orthogonaux, appelés composants principaux.

$$Z = X.V$$

Or jusqu'à présent, la matrice V comporte autant de composantes principales qu'il y avait de propriétés, c'est-à-dire 6. Il s'agit de n'utiliser que deux de ces principaux composants pour définir les poudres et pour cela il est nécessaire de connaître la variance exprimée par chacune des composantes principales. Cette variance (v) va être reliée à une composante principale et donc à une valeur propre λ par la formule suivante :

$$v = \frac{\lambda}{Trace(S)}$$

Pour tracer les données dans un plan, il s'agit donc d'utiliser les deux composantes principales permettant de garder le plus de variance dans l'ensemble des poudres. Dans le langage Python, la bibliothèque « scikit-learn », qui a déjà été utilisée pour normaliser les données, propose l'outil « PCA » du module « decomposition ». Cette fonction permet d'effectuer la décomposition en composantes principales et de récupérer les informations nécessaires, répertoriées dans le tableau ci-dessous. Pour la suite, les vecteurs propres qui sont les composantes principales sont maintenant notés « PC » pour plus de clarté.

Dans le Tableau 11, les composantes principales (les colonnes) sont classées par variance décroissante. Les deux composantes les plus intéressantes sont donc les deux premières et ce sont celles-là qui seront utilisées pour représenter les données dans le plan. Il est intéressant de remarquer que le premier vecteur, PC1, est essentiellement composé de deux propriétés : la densité compactée et la perméabilité des poudres, car leurs coefficients sont les plus importants. Le second est plutôt constitué par l'écart-type des angles de repos mesurés. Ces deux vecteurs représentent 79 % de la variance des données, donc les trois propriétés citées sont celles qui impactent le plus la variance du domaine des poudres. Les autres propriétés ne doivent pourtant pas être mises de côté puisqu'elles sont largement prédominantes dans un des autres vecteurs « PC i ».

Tableau 11 : Décomposition en composantes principales

	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6
VALEURS PROPRES	0,47209	0,414518	0,277214	0,132117	0,087807	0,058049
VARIANCE (%)	44,57 %	34,36 %	15,37 %	3,49 %	1,54 %	0,67 %
ANGLE DE REPOS	-0,15934	0,155481	0,044641	-0,82717	-0,4039	-0,31796
DENSITÉ COMPACTÉE	0,652619	0,263753	-0,69353	-0,09435	0,048028	-0,11102
RATIO DE HAUSNER	-0,07045	-0,05901	0,064827	-0,31031	0,891659	-0,30985
ECART-TYPE DE L'ANGLE DE REPOS	0,026402	-0,93432	-0,30943	-0,11617	-0,10484	-0,07816
RATIO D'EXPANSION	-0,04973	-0,00203	-0,12061	-0,41808	0,166218	0,883489
PERMÉABILITÉ	0,735231	-0,17266	0,634447	-0,14937	-0,02972	0,062513

La fonction « PCA » utilisée permet également de transformer directement les propriétés de la matrice X pour former la matrice Z. La dimension des données est donc réduite à 2, tout en gardant 78,93 % de la variance, soit presque 80 % et les poudres, représentées dans la base orthogonale des vecteurs PC1 et PC2, sont alors tracées. Chaque point du graphique de la Figure 19 est coloré selon le type de la poudre afin de pouvoir les différencier (farine de blé, poudre de lait, maïs concassé, etc....) et la légende du graphique est donc formée par les types de poudres présents dans la base de données.

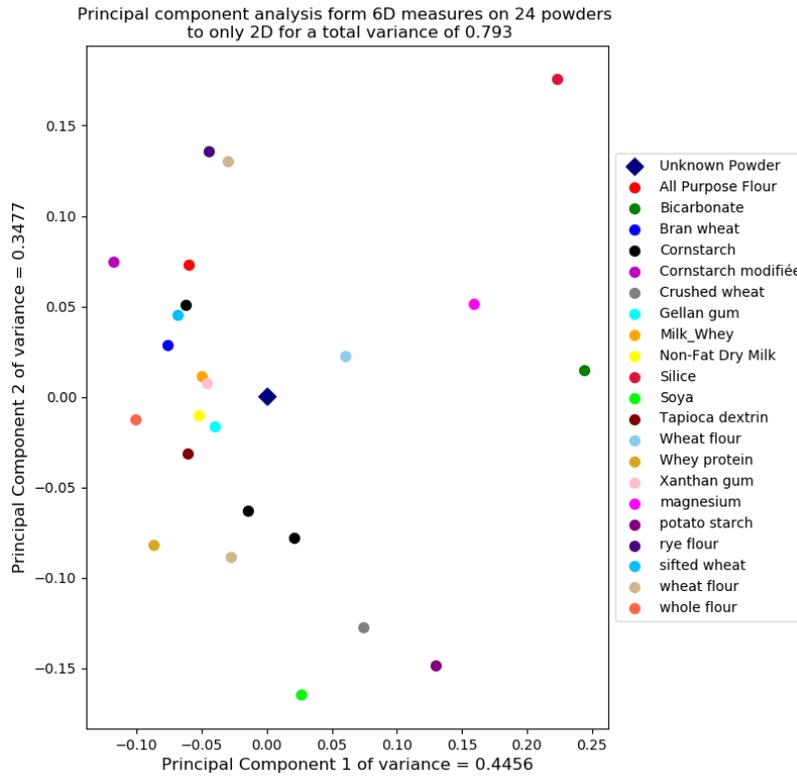


Figure 19 : Graphique de la répartition des poudres connues dans leur plan de variance

Le graphique ci-dessus représente toutes les poudres (au nombre de 25) présentes dans la base de données, ainsi qu'une poudre inconnue. En effet, le but de cette représentation pour l'entreprise est de disposer d'un outil visuel de comparaison rapide des poudres. Lorsqu'une nouvelle poudre, inconnue, est étudiée, il suffit de mesurer ses six propriétés et de les entrer dans l'application pour la placer sur ce graphique. Dans ce cas, afin d'avoir une représentation la plus globale du domaine des poudres, la poudre inconnue est constituée de toutes les valeurs médianes des propriétés pour les poudres connues (voir tableau ci-dessous). En effet, si la poudre inconnue est définie uniquement par des « 0 », elle sera très éloignée des autres poudres et l'échelle du graphique s'adaptera pour que tous les points soient visibles. Ici, en utilisant la médiane de chaque propriété pour les 25 poudres connues, le graphique est centré sur la représentation globale du domaine des poudres.

Tableau 12 : Propriétés de la poudre inconnue utilisée

Propriété	Valeur médiane des 25 poudres connues, utilisée pour la poudre inconnue
Angle de repos	48
Densité compactée	0.74
Hausner	1.34
Écart-type de l'angle de repos	0.05
Ratio d'expansion	1.23
Perméabilité	1.1

Sur le graphique de la figure 19, il est possible d'observer au premier abord que beaucoup des poudres connues sont assez ressemblantes les unes aux autres. En effet, on remarque deux agglomérations de points qui trahissent une ressemblance importante entre les propriétés de ces produits. En revanche, certaines poudres sont vraiment différentes des autres poudres, par exemple la poudre de soya, le sable (silice), le bicarbonate, la fécule de pomme de terre ou la fécule de maïs modifiée qui se situent aux extrémités du graphique.

Il est important de préciser l'utilité première de cette carte représentant la répartition des poudres dans leur domaine de variabilité : il s'agit de représenter facilement le comportement de chaque poudre, et de pouvoir observer d'un simple regard si la poudre inconnue qui est étudiée se situe plutôt dans le domaine des poudres les plus communément ensachées ou non. Lors de la première analyse d'une poudre, la marche à suivre est détaillée dans le digramme ci-dessous.

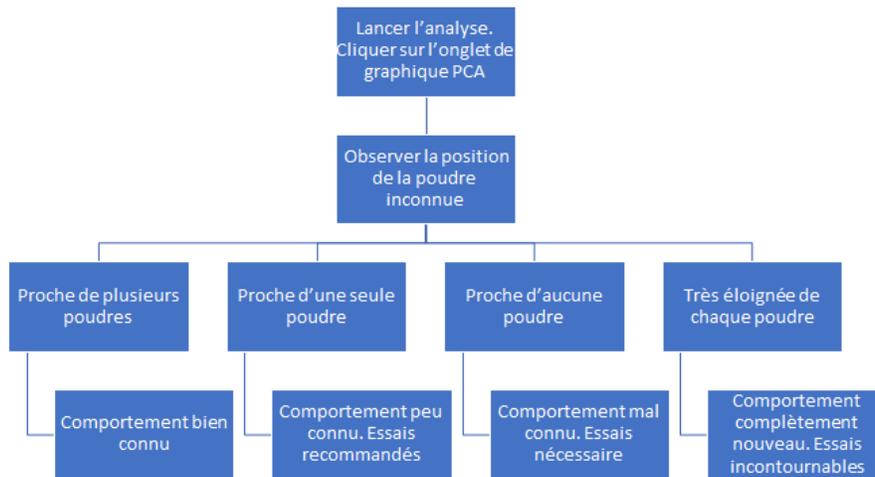


Figure 20 : Processus d'analyse de la carte de répartition des poudres connues

Cette première analyse permet de savoir si le comportement global de la poudre est plutôt bien connu ou bien au contraire si la poudre est vraiment complètement différente de ce qui a déjà été ensaché avec le type de machine que l'on étudie (une ensacheuse de type « bottom up » fabriquée par Premier Tech Chronos, qui dépose la poudre au fond du sac grâce à une vis).

Cette méthode possède plusieurs avantages :

- Les composantes principales sont décorréélées, donc ne sont plus liées entre elles contrairement aux six propriétés définissant les poudres
- Ces nouvelles valeurs sont des combinaisons linéaires de plusieurs des caractéristiques. Donc la représentation 2D qui en découle possède la particularité de prendre en compte plusieurs éléments de variation des poudres.

Pour en terminer avec cet outil de comparaison des poudres, la variance exprimée par la représentation graphique, basée sur les six propriétés, qui utilise deux composantes principales est de 79 %. Ce pourcentage de variance est simplement un indicateur de l'état actuel de la base de données et peut varier selon les poudres qui sont ajoutées. De plus, il est

intéressant de remarquer que 93,3 % de la variance des poudres est exprimée par les trois premiers facteurs et que les quatre premiers expriment 96,8 % de l'étendue des données. Ainsi seules 3 ou 4 composantes principales, qui sont des combinaisons linéaires des six propriétés des poudres, sont nécessaires pour caractériser plus de 90 % de l'étendue des poudres connues dans cette étude. Ce résultat sera réutilisé lors de l'utilisation des modèles de prédiction en partie 3.

2.3.2 Comparaison des poudres par similarités

A. Calcul du pourcentage de similarités

C'est grâce à la mise en place de protocoles de test des poudres et grâce à la création d'une base de données que la première idée fut de comparer les poudres entre elles. Le but de cette comparaison est de pouvoir observer les poudres ressemblantes à une poudre inconnue pour laquelle seules les caractéristiques auraient été mesurées. La comparaison précédente utilise un outil graphique et permet une analyse qualitative très utile pour les ingénieurs qui étudient ces produits. Il s'agit à présent d'utiliser un outil plus quantitatif pour comparer les poudres entre elles par leur rhéologie.

Pour cela, le tableau des six propriétés normalisées (dont la structure est donnée à la Figure 14) présenté en section 2.1.2 est réutilisé. Pour comparer les poudres entre elles, la méthode qui va être présentée va permettre de trouver la poudre qui possède la valeur la plus proche de celle de la poudre inconnue, pour chaque caractéristique. Ainsi pour chaque caractéristique, le programme va sélectionner uniquement la colonne de la caractéristique étudiée puis va soustraire à toute la colonne la valeur de la poudre inconnue pour cette caractéristique. Le tableau est donc formé par les écarts en valeur absolue entre chaque poudre et la poudre inconnue qui est étudiée. Cette différence est ensuite divisée par la valeur de la caractéristique de la poudre inconnue, et finalement le tableau contient une valeur en pourcentage de différence entre la chaque poudre de la base de données et la poudre étudiée,

que l'on note $e\%$. Pour obtenir un pourcentage de similarité ($s\%$), il suffit alors de prendre $(100 - e\%)$.

Pour récapituler, les formules de calculs qui sont appliquées aux matrices des données sont les suivantes, où « p_i » est la valeur de la propriété pour une poudre i et où « p_x » est la valeur de cette même propriété pour la poudre inconnue étudiée x :

$$e_{\%} = \frac{|p_i - p_x|}{p_x} \quad \text{et} \quad s_{\%} = 100 - e_{\%}$$

De plus, ces calculs sont également utilisés pour trouver la poudre qui est la plus proche de la poudre inconnue par son comportement général. En effet, grâce au tableau des pourcentages de similarité, une moyenne des similarités est calculée pour chaque poudre. C'est parmi ces moyennes que la poudre la plus ressemblante en moyenne, c'est-à-dire celle qui a l'erreur la plus faible, va être choisie. Elle est alors la 7^e poudre similaire qui est affichée dans la fenêtre de comparaisons de l'application. Il est d'ailleurs tout à fait possible que la poudre la plus proche en moyenne soit déjà une des poudres similaires d'après une des 6 caractéristiques. Pour la recherche de la poudre la plus similaire, aucune distinction n'est faite entre les propriétés bien qu'elles n'aient pas toutes le même impact sur la variance du domaine des poudres, sur le flux d'ensachage ou sur la précision de l'ensachage.

B. Affichage de la comparaison par similarités

Une fois que les 7 poudres similaires à celle qui est étudiée ont été trouvées, le programme dispose de 7 noms de poudres, une pour chaque caractéristique plus une qui représente le comportement général. Pour chaque poudre trouvée, l'interface graphique affiche le nom de la poudre, son pourcentage de similarité par caractéristique. Cette étape produit donc 6 poudres similaires et sont affichées dans l'application comme le montre la figure suivante.

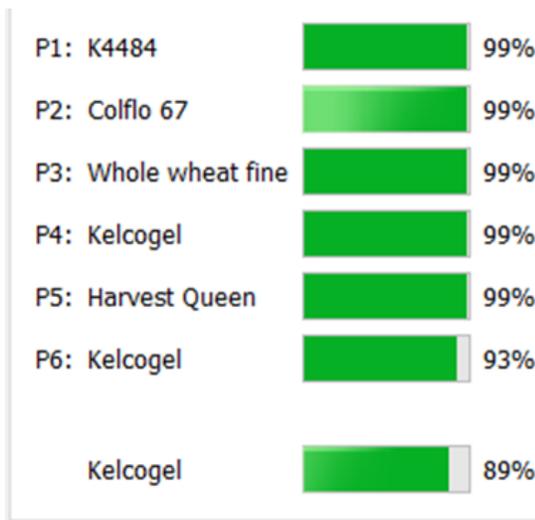


Figure 21 : Affichage des 6 poudres similaires pour les 6 propriétés et de la poudre similaire en moyenne ainsi que leurs pourcentages de similitudes

Cette figure montre l’affichage des poudres similaires à la poudre étudiée, mais le programme ne s’arrête pas à la simple recherche des poudres les plus ressemblantes. Il cherche également dans la base de données le comportement de chaque poudre ressemblante et affiche les conditions de paramétrage de la machine (ouverture et vitesse de vis) qui permettent le meilleur remplissage selon deux critères. Pour finir, l’affichage comprend pour chaque poudre similaire :

- Le nom
- Le pourcentage de similarité
- La meilleure performance de flux obtenue en mode remplissage rapide et de précision obtenue en remplissage de précision
- La précision ou le flux correspondant
- La vitesse de vis et l’ouverture de remplissage qui ont permis ces valeurs

L'affichage complet est représenté par la figure 25, et l'affichage complet sera expliqué plus en détail dans les prochains paragraphes.

La recherche des poudres similaires est à mi-chemin entre une comparaison qualitative et une comparaison quantitative, mais représente bien le type de comparaison qui pourrait être faite par un expert humain qui aurait une bonne connaissance des poudres, mais avec la puissance de la mémoire d'un ordinateur. C'est dans cette optique que la comparaison ici présentée est la plus simple à mettre en place et celle qui se rapproche le plus de ce qu'un humain essaiera de savoir après avoir effectué un test rapide sur un produit : est-ce qu'un produit similaire a déjà été manipulé et si oui quelles sont ses performances ?

Néanmoins et comme toutes les analyses et les prédictions qui vont suivre dans ce mémoire, la solidité et la pertinence de l'analyse suppose que l'ensemble des données récoltées est suffisant pour représenter toutes les poudres possibles. C'est sur ce point qu'intervient le pourcentage de similitude entre deux poudres, pour une propriété donnée, illustrés par la figure 24. En effet, pour un pourcentage de 99 % il est aisé de dire que le comportement sera en effet très proche de celui affiché par le logiciel. En revanche pour des pourcentages inférieurs à 90 % la comparaison permet simplement de dire que la base de données ne contient pas assez de poudres proches du comportement de la poudre étudiée. C'est pourquoi, lorsque le pourcentage de similitude est faible, toutes les analyses et prédictions qui seront effectuées ne sont finalement qu'indicatives et que des essais réels sur le banc de test de la machine sont indispensables. C'est donc dans ces cas que le protocole de test sur l'ensacheuse de référence doit être suivi afin de pouvoir ajouter cette poudre à la base de données afin de la faire évoluer et qu'elle devienne de plus en plus performante.

C. Affichage des performances des poudres similaires

Pour effectuer un lien entre la comparaison via les caractéristiques rhéologiques des poudres, le programme va chercher chaque poudre similaire dans la base de données et affiche ses performances optimales pour chaque ouverture de remplissage.

Pour le remplissage brut (rapide) ce qui est recherché est le flux maximal puisqu'avec une grande ouverture au début du remplissage il faut ensacher de la poudre le plus rapidement possible. Ce mode permet d'atteindre un bon rendement de remplissage puisqu'une grande quantité de poudre est ensachée en peu de temps. Pour les deux grandes ouvertures (120,7 et 63,5 mm) qui sont étudiées selon le protocole établi, c'est donc le flux maximal qui sera recherché puis affiché par le programme. Pour le remplissage fin, c'est la précision d'ensachage que l'on veut optimiser puisqu'il s'agit d'ensacher un certain poids précisément grâce à des ouvertures et des vitesses faibles. La précision est donc un indicateur de vente primordial de la machine au client et c'est pour cela que pour les 3 ouvertures les plus petites c'est le paramétrage permettant la précision la plus fine qui sera affichée dans ce tableau d'analyse comparative des poudres.

Finalement, le tableau de comparaison des poudres contient une colonne pour chaque ouverture de vis et une ligne pour chaque poudre similaire pour une propriété d'étude donnée. Dans chaque case de ce tableau illustré à la Figure 22, un triplet de valeurs est affiché : la vitesse de vis correspondant au paramétrage le plus optimal, le flux de poudre pour ce paramétrage et la précision de remplissage associée.

9.0 Rps ; 10.72 Kg/s ; 122.2 grams	9.0 Rps ; 10.38 Kg/s ; 301.1 grams	4.0 Rps ; 3.82 Kg/s ; 26.5 grams	Torque Error	Torque Error
8.0 Rps ; 9.56 Kg/s ; 1374.1 grams	8.0 Rps ; 8.87 Kg/s ; 157.2 grams	0.5 Rps ; 0.59 Kg/s ; 15.3 grams	1.0 Rps ; 1.03 Kg/s ; 40.4 grams	1.0 Rps ; 1.02 Kg/s ; 43.6 grams
9.0 Rps ; 7.86 Kg/s ; 851.4 grams	9.0 Rps ; 6.96 Kg/s ; 1365.7 grams	0.5 Rps ; 0.51 Kg/s ; 34.6 grams	0.5 Rps ; 0.21 Kg/s ; 45.1 grams	Torque Error
9.0 Rps ; 4.96 Kg/s ; 246.8 grams	9.0 Rps ; 4.43 Kg/s ; 420.2 grams	0.5 Rps ; 0.34 Kg/s ; 41.6 grams	1.0 Rps ; 0.15 Kg/s ; 11.5 grams	0.5 Rps ; 0.07 Kg/s ; 11.5 grams
9.0 Rps ; 8.06 Kg/s ; 30.6 grams	9.0 Rps ; 5.64 Kg/s ; 21.4 grams	1.0 Rps ; 0.8 Kg/s ; 20.0 grams	1.0 Rps ; 0.58 Kg/s ; 20.8 grams	Torque Error
9.0 Rps ; 4.96 Kg/s ; 246.8 grams	9.0 Rps ; 4.43 Kg/s ; 420.2 grams	0.5 Rps ; 0.34 Kg/s ; 41.6 grams	1.0 Rps ; 0.15 Kg/s ; 11.5 grams	0.5 Rps ; 0.07 Kg/s ; 11.5 grams
9.0 Rps ; 4.96 Kg/s ; 246.8 grams	9.0 Rps ; 4.43 Kg/s ; 420.2 grams	0.5 Rps ; 0.34 Kg/s ; 41.6 grams	1.0 Rps ; 0.15 Kg/s ; 11.5 grams	0.5 Rps ; 0.07 Kg/s ; 11.5 grams

Figure 22 : Fenêtre de l'application montrant les poudres similaires à la poudre étudiée

Cette capture d'écran de l'application permet d'illustrer l'affichage de la comparaison des poudres. Cet outil s'appuie sur des données beaucoup plus tangibles que les composants principaux évoqués dans la sous-partie précédente puisque les comparaisons sont effectuées directement sur les propriétés des poudres.

On y retrouve les informations de l'ensachage optimal obtenu pour chaque configuration d'ouverture. Chaque colonne représente une ouverture de remplissage, donc les deux plus grandes ouvertures sont les deux premières (remplissage rapide) et les trois plus petites définissent le remplissage de précision. Chaque ligne est une poudre, et plus précisément la poudre la plus similaire trouvée à l'étape précédente, et dont l'affichage est illustré à la Figure 21. Ensuite, chaque colonne contient 3 informations : la vitesse pour laquelle l'optimal est obtenu, le flux correspondant et la précision atteinte. Par exemple à la Figure 22, il est possible de voir les performances optimales des poudres les plus similaires à celle que l'on étudie dans cet exemple. Ainsi pour les deux premières ouvertures, pour lesquelles c'est le flux optimal qui est recherché, on remarque que les flux sont assez élevés puisque pour quatre d'entre eux, ils sont supérieurs à 7 kg/s. La dernière ligne, qui est celle de la poudre la plus ressemblante en moyenne, qui est également la même poudre que les lignes numéro 4 et 6, atteint un flux maximal plus faible. Le flux auquel on doit s'attendre se situe donc proche de celui de la poudre de la dernière ligne, puisque c'est celle qui est la plus ressemblante en moyenne et qu'elle apparaît aussi deux fois en tant que poudre la plus similaire pour une propriété, mais le flux sera supérieur à 4.96 kg/s, car toutes les autres poudres similaires ont permis d'obtenir des flux supérieurs. De plus tous les flux maximaux ont été obtenus avec des vitesses rapides (8 ou 9 rotations par secondes) de la vis, il faut donc s'attendre à atteindre ces vitesses. Pour le remplissage fin, c'est-à-dire les trois dernières colonnes du tableau de cette figure, le même raisonnement peut être appliqué, en s'intéressant à la précision d'ensachage la plus faible. Une très bonne précision de 11,5 grammes est obtenue avec la poudre la plus ressemblante en moyenne, pour des vitesses assez faibles et les ouvertures les plus petites. Ce résultat est à nuancer avec le fait que pour certaines des autres poudres similaires, des erreurs de couple ont été décelées pour les ouvertures les plus petites et qu'il faut donc s'attendre à d'éventuels blocages de la vis avec la poudre inconnue qui est étudiée dans cet exemple. Dans l'ensemble, cette poudre devrait être ensachée précisément puisque la plus précision la moins bonne est 45.1 grammes, ce qui reste une précision très bonne relativement à la masse ciblée de 25 kg par exemple.

Le tableau des performances est donné à titre indicatif, pour indiquer les ordres de grandeur atteints par les poudres similaires. Or la base de données utilisée dans ce programme a également accès aux poudres qui ont été caractérisées dans le laboratoire, mais qui n'ont pas été encore mesurées dans la machine d'ensachage. Si une telle poudre est trouvée en tant que poudre similaire, la ligne correspondante affichera « Aucune donnée ». Dans ce cas-là, ce sera l'expérience du responsable ayant travaillé sur cette poudre qui pourra apporter les informations nécessaires à l'étude plus profonde des poudres similaires qui vient d'être faite dans le paragraphe précédent à titre d'exemple. De cette manière la comparaison peut trouver des poudres qui ont seulement été mesurées rapidement dans le laboratoire. Cet outil peut donc s'appuyer sur une base de données bien plus rapide à agrandir. Cet aspect de la comparaison était très important pour le domaine industriel du projet, car il est souvent difficile de faire toutes les mesures nécessaires sur les poudres que ce soit en laboratoire et surtout sur la machine. Cet outil de comparaison permet donc de gravir quelques échelons dans l'analyse des poudres, tout en restant rapide à mettre en place.

D. Analyse des similarités

La comparaison des poudres entre elles donne une information à propos de leur comportement : pour chaque propriété, la poudre similaire et ses performances sont affichées. L'analyse de l'exemple de la Figure 22 effectuée précédemment montre comment il est possible d'interpréter ces résultats pour une poudre inconnue dont les poudres similaires connues sont toutes similaires à plus de 90 % (voir Figure 21). Cette comparaison s'effectue sur les six propriétés des poudres qui ont été choisies, car elles étaient proches des sollicitations subies par la poudre dans la machine (Figure 1, partie 1.2.1). Cette comparaison, par extension, permet donc de comparer le comportement des poudres selon chaque sollicitation.

Reprenons à titre d'exemple les deux figures précédentes montrant les poudres similaires de la poudre fictive qui a été étudiée. Premièrement, il est important de remarquer

que tous les pourcentages de similitude sont supérieurs à 90 %. Ce constat montre que la poudre fictive, qui a été créée en utilisant des caractéristiques parmi les plus communes, constitue une poudre assez générique. Son comportement rhéologique est donc assez commun, ce qui permet donc de trouver des poudres qui ont sensiblement le même comportement. Les poudres 1, 3 et 5 ne peuvent pas être ensachées avec l'ouverture la plus petite. Cette information est importante puisque la recette d'ensachage devra donc éviter ce paramétrage de la machine pour éviter que la poudre induise des défauts de couple de la vis lors de son ensachage. Lorsque les 6 poudres similaires pour chacune des propriétés sont différentes, le pourcentage de similitude de la septième poudre, la similarité moyenne, est souvent plus faible que les autres pourcentages. Ceci s'explique par le fait que pour la moyenne le programme va chercher la poudre en utilisant la moyenne des similarités. Ainsi le pourcentage indiqué est une distance scalaire multidimensionnelle entre la poudre inconnue et la poudre similaire.

De cette manière, pour chaque poudre similaire trouvée et comme il s'agit de la plus ressemblante, son pourcentage de similarité permet de savoir si son comportement est connu ou non. En effet, si les pourcentages sont tous élevés (plus de 90 %), alors le comportement de cette poudre est bien connu grâce aux poudres similaires qui sont connues et qui lui ressemblent beaucoup. Dans ce cas, le programme de prédiction, qui sera étudié dans la suite de cette étude, aura plusieurs poudres similaires à sa disposition pour se baser sur leur comportement afin de réaliser une prédiction. Au contraire, si les pourcentages sont faibles (on peut fixer la limite à 70 % par exemple), cela signifie qu'aucune poudre n'a réellement ce comportement global. Dans ce cas le programme utilisera des poudres moins ressemblantes et ses prédictions seront moins fiables, car le comportement de cette poudre n'aura jamais été observé dans la base de données. Pour des cas intermédiaires où une partie des pourcentages sont élevés et une autre partie sont faibles, il sera intéressant de prendre en compte le comportement des poudres similaires avec un pourcentage haut tout en considérant que le comportement global de la poudre étudiée n'est pas réellement bien connu.

L'analyse des poudres similaires trouvées peut s'avérer très utile pour l'étude préliminaire d'une poudre : avec seulement les mesures des propriétés des poudres, qui sont normalisées pour les comparaisons, cet outil permet d'aider grandement à la préparation du devis au client. En effet, si la poudre inconnue à ensacher s'avère vraiment proche, il suffira de copier la conception de la machine ayant déjà réussi à ensacher ce genre de poudre. Les recettes pourront ensuite être adaptées à la nouvelle poudre en partant de celles fonctionnelles pour les poudres similaires connues. Ainsi une grande partie de l'étude est facilitée par le fait de savoir que ce genre de poudre est bien connu. Au contraire, si une poudre est complètement différente de ce qui est connu par la base de données, il sera plus judicieux de demander plus de produit au client pour réaliser des essais grandeur nature. Ces tests viendront ensuite améliorer la connaissance de la base de données.

Au sujet des erreurs d'ensachage, cette comparaison permet de prévoir les éventuelles erreurs qui peuvent survenir lors du passage de la poudre dans la machine. Par exemple, si toutes les poudres similaires de la poudre étudiée créent des erreurs d'ensachage pour certaines ouvertures, il faudra s'attendre à ce comportement pour la poudre inconnue également. Cette analyse est à nuancer, comme la précédente, selon le nombre de poudres similaires qui créent ces erreurs et leur pourcentage de similarité.

La figure suivante présente le processus d'analyses provisoire pour aider l'utilisateur à interpréter les résultats des comparaisons de la poudre inconnue avec celles de la base de données. Ce diagramme est suggéré à la suite de la création de cet outil, mais devra être étudié plus en profondeur pour être adapté et que les performances exactes de cet outil soient vérifiées.

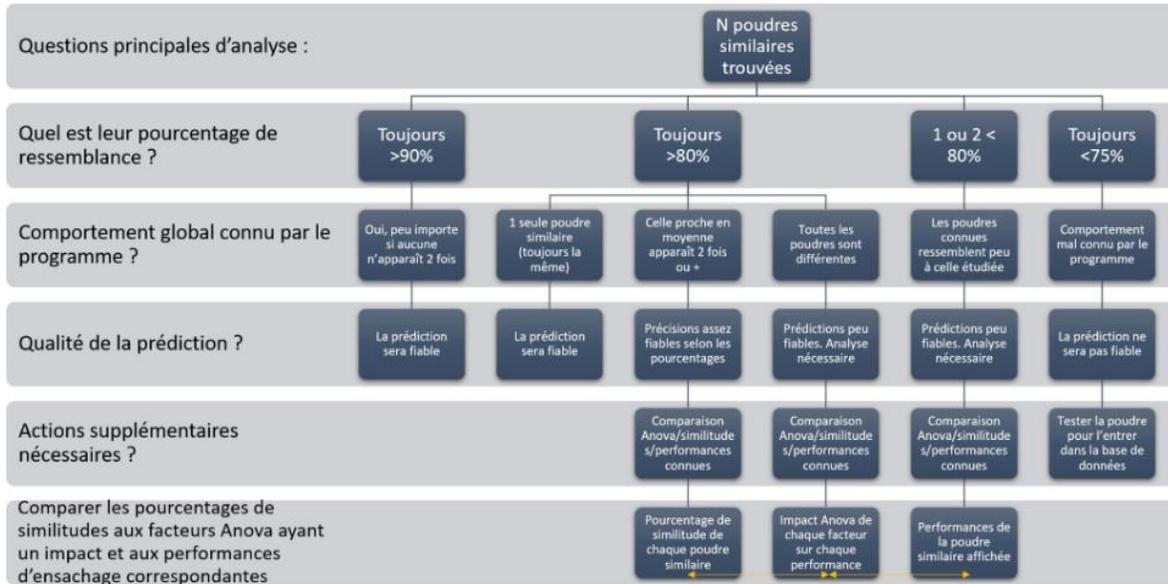


Figure 23 : Diagramme des possibilités d'interprétations des similarités

Ce schéma montre les différentes possibilités qui peuvent se présenter lors de l'analyse de ce tableau de comparaisons. Les pourcentages limites se basent sur une expérience qualitative du comportement global des poudres dans la machine, mais une étude plus approfondie serait nécessaire pour améliorer ce diagramme pour en faire un outil d'aide à la décision fiable et robuste.

Finalement, l'utilité des poudres similaires trouvées ne s'arrête pas à l'analyse présentée. Ces 7 poudres vont être utilisées lors du tracé des performances prédites. En effet l'algorithme de prédiction va se baser sur les données pour prédire un comportement, mais il s'agit par la suite de vérifier la fiabilité de cette précision. C'est pour cette raison que les pourcentages de similarités étaient un bon indicateur pour savoir si la base de données contenait ce type de comportement ou non. Les performances d'ensachage des poudres similaires seront donc tracées sur le même graphique que les performances prédites, ce qui sera abordé dans la prochaine partie traitant de la prédiction.

2.4 CONCLUSION

Les mesures des propriétés des poudres sont stockées dans un fichier de tableur qui permet de les entrer et de les manipuler facilement. À la suite de leur mesure, il s'agit en effet d'en garder une trace et surtout d'être capable de les utiliser pour mieux connaître le comportement des poudres, ce qui constitue la seconde phase de ce projet. L'utilisation conjointe des tableaux et d'un programme codé en Python permet de bien manipuler les données. Ces manipulations des données permettent d'observer et d'analyser les comportements des poudres, que ce soit de manière graphique ou avec des indices de comparaisons. Grâce à la réduction de la dimension des poudres par l'analyse des composantes principales des poudres, il est possible d'observer leur domaine de variabilité ce qui permet une première analyse comparative visuelle. De plus il est possible, uniquement grâce à leurs propriétés caractéristiques, de comparer les poudres simplement avec des calculs d'écart, et grâce aux fonctions développées, de comparer une poudre inconnue à celles présentes dans la base de données graphiquement et quantitativement. Ces outils permettent donc de réaliser des études préliminaires sur le comportement attendu d'une poudre inconnue en ayant simplement mesuré ses propriétés.

CHAPITRE 3

PRÉDICTION DE L'ENSACHAGE GRÂCE AUX CARACTÉRISTIQUES

Le but recherché a toujours été de prédire les performances d'une poudre inconnue lors de l'ensachage sans effectuer les essais sur le banc de test. Ce qui a été présenté précédemment montre qu'il est effectivement possible de caractériser les produits en poudre de manière plus simple, plus rapide et surtout avec une taille d'échantillon vraiment pratique (1 kg contre 100 kg). De plus, ces caractéristiques permettent de comparer les poudres entre elles et d'observer les ressemblances dans leur comportement macroscopique. Dans cette dernière partie, l'intérêt va être porté sur la recherche d'une méthode de prédiction qui permettrait de déterminer immédiatement après la caractérisation d'une poudre son comportement dans la machine.

La performance lors de l'ensachage dépend de 2 indices : le flux de matière et la précision de remplissage. Un troisième indice de l'ensachage est le code d'erreur, qui permet de savoir si l'ensachage est possible avec les paramètres machine correspondants. Comme cela est présenté en 2.1.2, la poudre est définie par un tableau dont la structure est donnée à la Figure 14. C'est ce tableau qui constitue les arguments de la fonction de prédiction, et il s'agit de prédire les performances de flux, de précisions et d'erreurs. Dans ce tableau, les indicateurs de caractéristiques sont déjà normalisés.

Pour le flux, c'est un modèle de prédiction par régression qui sera retenu alors que pour la précision de l'ensachage et ses erreurs éventuelles, la prédiction se fera par le biais d'une classification. De plus, le programme de prédiction va être séparé pour chaque ouverture afin de s'affranchir des problèmes liés à une trop grande différence entre les valeurs des ouvertures utilisées dans cette étude qui apporterai une discontinuité des analyses à cause du fait que seules 5 ouvertures sont étudiées. Le programme de prédiction est donc constitué de

plusieurs étapes d'apprentissage des données et de plusieurs étapes de prédictions. Ces étapes seront présentées dans cette dernière partie en débutant par le type de modèle qui a été choisi pour effectuer l'apprentissage et la prédiction du comportement des poudres dans ce type de machine.

3.1 OUTILS DE PRÉDICTION DISPONIBLES

3.1.1 Notions de base sur les modèles de prédictions numériques

Le flux de la poudre et sa précision lors de l'ensachage sont des fonctions continues puisqu'elles sont définies par un phénomène physique réel mesuré respectivement en kg/s et en g. Dans un premier temps, il s'agit donc de tenter de les associer à des fonctions continues pour ensuite les utiliser pour la prédiction. Afin de réaliser cet apprentissage, beaucoup de fonctions de régression existent, et il s'agit de choisir la meilleure. Tout au long de cette troisième partie, des outils informatiques vont être présentés et utilisés afin de réaliser la prédiction du comportement des poudres. Ce sont des modèles d'apprentissage supervisé ce qui signifie qu'ils adaptent leur prédiction en fonction de données de référence comprenant les variables (ici les propriétés des poudres) et les images (ici le flux, la précision ou les erreurs d'ensachage). Pour un modèle supervisé, la quantité que l'on veut prévoir doit avoir été mesurée afin que le programme puisse adapter sa prédiction en fonction de cette valeur.

Dans le vocabulaire utilisé en apprentissage automatisé, c'est-à-dire l'apprentissage par un programme informatique, on retrouve les expressions suivantes, qui sont également expliquées afin de permettre au lecteur de comprendre toutes les étapes qui vont suivre.

- Ensemble d'apprentissage, aussi appelé ensemble d'entraînement : c'est un ensemble de données, comprenant les variables d'entrée et de sortie du comportement étudié, qui est utilisé pour l'apprentissage du modèle. C'est

grâce à cette quantité de données que le programme adapte ses coefficients et les poids de ses paramètres pour s'adapter aux données

- Ensemble de test : c'est un ensemble de données de la même nature que le précédent qui est utilisé après l'apprentissage afin de vérifier la prédiction du modèle sur des données qui n'ont pas été utilisées pour l'apprentissage
- Hyperparamètres : ce sont les paramètres du modèle. Ces paramètres sont à définir avant d'utiliser le modèle et permettent de définir sa vitesse d'apprentissage par exemple ou le nombre de poudres voisines prises en compte selon le type de modèle.
- Régularisation : cette méthode consiste à ajouter à un polynôme un terme (de régularisation) qui permet de diminuer le poids des coefficients du polynôme, ce qui permet de réduire le surapprentissage du modèle
- Surapprentissage : lorsqu'un modèle d'apprentissage supervisé est utilisé, le surapprentissage doit être évité, car cela signifie que le programme n'est efficace que sur des points où il a été entraîné. Il n'est plus capable de généraliser le comportement physique étudié au-delà de l'ensemble d'entraînement.
- Norme : une norme est un outil de calcul de la taille d'un vecteur par exemple. Dans ce document, la norme L1 et la norme L2 seront utilisées. Elles se définissent par les fonctions suivantes, pour le calcul de la norme d'un vecteur V de composantes v :

$$L1 : \left(\sum v_i \right) \quad L2 : \sqrt{\sum v_i^2}$$

3.1.2 Inventaire des principales fonctions de régression

Le module « scikit-learn » est la bibliothèque Python qui permet l'utilisation d'outils de régressions et d'apprentissage supervisé. Différents outils ont déjà été présentés pour manipuler les données afin de les préparer à la prédiction, ce à quoi cette partie va se consacrer. La difficulté du choix du modèle réside dans plusieurs limitations dues aux données :

- Une grande dimensionnalité (6 propriétés, 1 vitesse, 1 ouverture)
- Le peu de données en possession (une vingtaine de poudres)
- Une grande variabilité des données

L'analyse des corrélations au chapitre 1 a montré l'absence d'une corrélation linéaire forte puisque les coefficients étaient assez faibles. La suite logique, après avoir montré qu'il y avait assez peu de corrélation linéaire, est de vérifier s'il est possible de construire une fonction polynomiale qui prenne en compte l'ensemble des propriétés. Les premiers essais des modèles qui vont être présentés ont abouti à des résultats peu convaincants à cause notamment de la trop grande dimensionnalité des données et le fait que l'ouverture était une variable discontinue. Comme cette variable a un grand impact sur la performance de la poudre dans la machine, la prédiction est séparée et sera effectuée pour chaque ouverture de manière indépendante.

Le premier modèle qui va donc être étudié est un modèle polynomial qui comporte autant de coefficients que de variables d'entrée (6 propriétés et une vitesse puisque l'ouverture n'est plus une variable du programme). Ces coefficients doivent être trouvés afin de minimiser les erreurs par rapport aux valeurs réelles de l'ensachage. Comme nous le verrons, un coefficient supplémentaire est ajouté à ce polynôme pour permettre la régularisation et ainsi ralentir l'apprentissage et empêcher le phénomène de surapprentissage. Ce point sera étayé dans les prochaines pages. Plusieurs méthodes d'apprentissage de

fonctions polynomiales avec régularisation existent et parmi celles-ci on retrouve celles-ci, qui sont les plus courantes et basiques :

- La méthode des moindres carrés généralisés avec régularisation selon la norme L2
- La méthode des moindres carrés généralisés avec régularisation selon les normes L1 et L2. Cela permet d'effectuer une discrimination entre les propriétés qui sont considérées comme redondantes par le programme et de sélectionner les meilleures propriétés.
- La méthode de Bayes, qui est une méthode probabiliste de recherche des coefficients du polynôme

Toutes ces méthodes permettent de trouver les coefficients c_i du polynôme qui a la forme mathématique suivante, où les X_{in} sont les propriétés normalisées de la poudre et V la vitesse de rotation de la vis :

$$Ensachage = \sum_{1}^{6} (c_i * X_{in}) + c_v * V$$

Les polynômes tentent de faire passer une fonction au plus proche des points expérimentaux, mais il arrive parfois qu'ils n'y parviennent pas assez bien. Dans ces cas-là, d'autres méthodes de régression existent. Par exemple via des arbres de décision ou bien à partir d'un algorithme de décision, par rapport aux valeurs proches (KPPV), il est possible de faire apprendre à un programme le phénomène comportemental étudié. Néanmoins ces deux dernières méthodes ne permettent pas de disposer d'une fonction constituée de coefficients qui s'appliquent aux propriétés. Ces modèles ont besoin d'avoir constamment accès à la base de données et ne permettent pas d'extraire une fonction de comportement qui serait utilisable dans un tableur pas exemple. Le modèle des arbres de décisions aléatoires s'adapte aux données en se définissant des chemins qui forment un diagramme représentant un arbre. Le modèle se définit par le nombre maximal de branches et de feuilles sur chaque

branche lors de sa construction. Cette construction influe sur la performance du modèle de prédiction résultant et est donc difficile à déterminer.

Pour ce qui est du modèle des « k plus proches voisins » (KPPV), il représente les données et parvient à reconnaître les données qui sont proches les unes des autres. Par rapport au cas qui doit être prédit, et peu importe la taille des variables d'entrée (ici les variables d'entrée sont de dimension 6 puisque 6 propriétés des poudres sont utilisées), le programme identifie les plus proches voisins et les distances multidimensionnelles qui le séparent de ces voisins. Il va donc utiliser ces distances pour pondérer les résultats des différents voisins et ainsi prédire la valeur de la variable étudiée pour le cas de l'étude. Ce modèle est très robuste pour des dimensions élevées et son mode de prédiction, en tenant compte des voisins, semble très prometteur.

Toutes ces approches relèvent de l'apprentissage supervisé puisque le programme doit apprendre le comportement des données pour s'adapter et prédire correctement. Pour minimiser les erreurs, les modèles ont des hyperparamètres qui doivent être choisis pour que le modèle adapte son apprentissage.

Le Tableau 13 montre les modèles qui ont été testés pour cette étude. D'autres modèles existent, mais ceux qui sont présentés dans le tableau précédent sont des modèles basiques, largement utilisés et pour lesquels de nombreux exemples sont proposés dans la documentation de la bibliothèque. Or ces modèles demandent de réaliser une étude complémentaire sur les hyperparamètres à utiliser pour optimiser leur valeur en fonction du comportement du programme lors de l'apprentissage des données. Cette étude est très longue et demande un grand nombre de données pour être réalisée manuellement.

Tableau 13 : Récapitulatif des modèles d'apprentissage supervisé disponibles

Modèle	Méthode de régularisation	Hyperparamètres	Documentation de la bibliothèque utilisée
« Ridge »	Moindres carrés généralisés Régularisation par la norme L2	Coefficient de régularisation « alpha »	Module « linear_model » de la bibliothèque python « scikit-learn » [21]
« ElasticNet »	Moindres carrés généralisés Régularisation par les normes L1 et L2	Coefficient de régularisation « alpha » et de répartition des normes « rho »	
« BayesianRidge »	Résolution de la formule de Ridge par la méthode de Bayes	Deux coefficients « alpha » et deux coefficients « lambda »	
« Random Forest Regressor »	Arbres de forêts aléatoires	Nombre de branches, et nombres de feuilles par branche	Module « ensemble » de la bibliothèque python « scikit-learn » [21]
« K Neighbors Regressor »	Adapte la prédiction en fonction des poudres les plus proches.	Nombre de voisins à prendre en compte	Module « neighbors » de la bibliothèque python « scikit-learn » [21]

Pour pallier le choix des hyperparamètres, ces fonctions sont utilisables conjointement avec un outil de validation croisée qui permet de tester automatiquement plusieurs valeurs pour l'hyperparamètre pendant l'apprentissage. Cet outil, appelé « cross_val_score », est disponible dans le module « model_selection » de la bibliothèque « scikit-learn » [21]. Il permet d'effectuer l'apprentissage avec plusieurs hyperparamètres différents et de sélectionner celui qui conduit à la meilleure prédiction. Pour cela, l'outil sépare lui-même les données en deux : un ensemble d'apprentissage et un ensemble de tests. Il retourne ensuite

la valeur de l'hyperparamètre qui a permis d'obtenir les meilleurs scores de prédiction. Cette solution va donc permettre de s'affranchir du choix de ces hyperparamètres, mais cela va également permettre de rendre l'algorithme plus adaptatif. En effet, au fil du remplissage de la base de données, l'algorithme pourra adapter les hyperparamètres utilisés pour que la prédiction reste toujours la meilleure possible. L'algorithme se charge de séparer les données en ensemble d'entraînement et de test et la meilleure prédiction est celle qui est la plus proche de la réalité pour l'ensemble de test sélectionné. La librairie « scikit-learn » de Python propose deux solutions permettant d'utiliser la validation croisée lors de l'apprentissage :

- Certaines fonctions de régression sont disponibles directement avec le module de validation croisée. C'est le cas de la fonction « Ridge » qui devient « RidgeCV » et de la fonction « ElasticNet » qui devient « ElasticNetCV ».
- La formation d'une boucle sur une liste d'hyperparamètres à tester par la fonction « cross_val_score » à laquelle on transmet le modèle de régression utilisé.

Le diagramme ci-dessous permet de comprendre le principe de la validation croisée, qu'elle soit intégrée à la fonction de régression ou non.

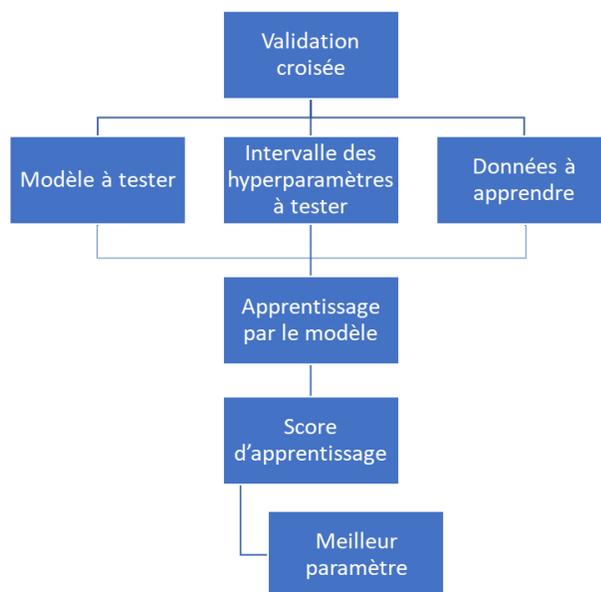


Figure 24 : Organigramme déclinant le processus de la validation croisée

La validation croisée utilise les données qui définissent le sujet de l'étude pour l'apprentissage du modèle, défini par chaque hyperparamètre qui doivent être testés. Tous ces apprentissages aboutissent à des scores que l'algorithme de validation croisée calcule, stocke et compare. L'hyperparamètre qui a permis le meilleur apprentissage est alors retourné par l'algorithme et il peut alors être utilisé pour définir le modèle de prédiction.

3.1.3 Premiers tests de prédiction

C'est le tableau dont la structure est présentée à la Figure 14 qui décrit le comportement de la poudre, les données sont donc séparées par ouverture d'ensachage. L'apprentissage va donc s'effectuer pour chaque ouverture indépendamment. Ce choix s'explique par le faible nombre de données disponibles puisque lors des premiers tests du programme, seulement 8 poudres étaient disponibles. Ces 8 poudres étaient très différentes donc l'ensemble des données avaient une très forte variabilité. En séparant les apprentissages par ouverture, l'apprentissage est facilité et sujet à beaucoup moins d'erreurs, et cela permet au programme de mieux s'adapter à la complexe réalité de l'ensachage des poudres. Même après l'obtention des données de 12 poudres supplémentaires, la séparation par ouvertures d'ensachage reste nécessaire.

Lors des premières prédictions, la précision de l'ensachage est très mal apprise par le programme. Cela s'explique par le fait que les précisions d'ensachage varient énormément d'une configuration (ouverture et vitesse) de la machine à l'autre. L'apprentissage par une fonction qui s'adapterait à la réalité devient hors de portée pour cet indicateur de la performance d'ensachage de la poudre. De plus, un autre indicateur de l'ensachage est obtenu à la suite de la mesure dans la machine : le code d'erreur éventuel. Comme cela a été vu dans la partie précédente, les erreurs sont codées selon les valeurs suivantes : -2 lorsque le sac est trop rempli ou trop lourd, -1 lorsque la vis se bloque, 0 lorsque la poudre n'a pas été mesurée ou 1 lorsqu'aucune erreur n'a lieu. Lors des erreurs codées « -2 » ou « -1 », le flux est abaissé à une valeur négative pour ne pas être confondu avec un manque de données. Cette

manipulation permet de comparer facilement les courbes prédites avec les courbes réelles de l'ensachage puisque dans la base de données, le flux est calculé en divisant la masse de poudre par le temps de remplissage de 2 secondes. Pour une erreur « -2 », le flux sera donc abaissé à -1 et pour une erreur « -1 » il sera abaissé à -0,5 pour correspondre aux valeurs de la base de données.

Les premiers tests des programmes de prédictions ont montré que le fait de prendre en compte les configurations où des erreurs avaient lieu induisait le programme en erreur : il ne parvenait pas à s'adapter à la réalité du flux négatif et de la précision nulle. Il tentait de lisser ce comportement en effectuant alors plus d'erreurs sur les valeurs qui avaient réellement un intérêt. La solution trouvée pour pallier ce problème consiste à retirer dans un premier temps les valeurs ayant conduit à des erreurs de l'ensemble d'apprentissage. Cet ensemble de données est donc constitué uniquement de mesures ayant abouti à un ensachage sans erreurs. Le programme peut donc apprendre sans encombre cet ensemble de données et construire sa fonction de prédiction. Le modèle aura donc appris le comportement des poudres sans les configurations où des erreurs se produisent, et il s'agira ensuite de savoir pour quelles configurations des erreurs d'ensachages sont prédites pour adapter la prédiction globale du flux et de la précision. En effet, une autre fonction a pour mission de prédire les erreurs éventuelles qui seront rencontrées dans l'ensemble des données pour déterminer les configurations où une erreur risque de se produire. Une fois ces configurations trouvées, et pour celles dont une erreur est prédite, le flux prédit est abaissé à -0,5 kg/s ou à -1 kg/s selon l'erreur qui est prédite et la précision prédite est abaissée à 0 gramme comme c'est le cas dans la base de données lorsqu'une erreur se produit. Cette valeur n'a rien à voir avec le code d'erreur « 0 » qui indique que la poudre n'a tout simplement pas été mesurée dans la machine, et dans ces cas-là le programme rejette la poudre dès le début du processus d'apprentissage et de prédiction. Cette méthode permet de bien meilleurs résultats d'apprentissage et des prédictions qui s'approchent beaucoup plus de la réalité du procédé d'ensachage.

3.1.4 Inventaire des fonctions de classification

Dans le but de faciliter l'apprentissage du programme, il est nécessaire de prédire le code d'erreur pour chaque configuration de la machine (ouverture et vitesse de rotation de la vis). Le code d'erreur est une variable qui n'est pas continue, mais catégorielle : elle permet de classer les configurations en 4 catégories pour chaque poudre. Comme la variable n'est pas continue, il n'est pas judicieux d'utiliser une fonction de régression qui ne pourrait pas reproduire le comportement souhaité. Le module « scikit-learn » contient des fonctions d'apprentissage supervisé qui permettent de prédire directement la classe d'un ensemble de données selon ses paramètres déterminants, ici la matrice des propriétés et des données de vitesse et d'ouverture.

Tableau 14 : Récapitulatif des fonctions de classification disponibles.

Modèle	Méthode de classification	Hyperparamètres	Documentation de la bibliothèque utilisée
« Logit »	Classification logistique	Aucun hyperparamètre	Module « linear_model » de la bibliothèque python « scikit-learn » [21]
« Random Forest Classifier »	Arbres de forêts aléatoires	Nombre de branches, et nombres de feuilles par branche	Module « ensemble » de la bibliothèque python « scikit-learn » [21]
« K Neighbors classifieur »	Adapte la prédiction en fonction des poudres les plus proches.	Nombre de voisins à prendre en compte	Module « neighbors » de la bibliothèque python « scikit-learn » [21]

Les modèles ci-dessus sont ceux qui seront testés pour choisir le meilleur permettant de réaliser la classification souhaitée. Il existe d'autres modèles que les trois présentés dans ce tableau, mais ces trois modèles sont les modèles basiques parmi les plus utilisés pour les

problèmes de classification. Comme pour les modèles de régression, ces modèles sont également très bien documentés et font l'objet de nombreux exemples qui permettent de comprendre leur fonctionnement.

De la même manière que pour les fonctions de régression, les fonctions citées dans le tableau ci-dessus sont utilisées de concert avec l'outil de validation croisée pour adapter les hyperparamètres le mieux possible.

En revanche, contrairement à la prédiction par régression, les données ne sont pas manipulées de la même manière. En effet, les erreurs d'ensachage dépendent certes de la poudre et donc de son vecteur caractéristique, mais également de la configuration de la machine, c'est-à-dire de la vitesse de rotation, mais surtout de la hauteur d'ouverture du système de remplissage. Or, pour la régression, ce paramètre n'est pas pris en compte puisque chaque régression est effectuée sur une seule ouverture à la fois. Afin de prendre en compte l'ouverture comme une variable de la classification des erreurs, aucune séparation des données ne sera effectuée à cette étape. La prédiction des classes d'erreurs se fera donc avec toutes les données normalisées décrivant le comportement des poudres, dont les variables ont été définies en 2.1, soit le vecteur suivant :

$$[0 \ V \ X_{1n} \ X_{2n} \ X_{3n} \ X_{4n} \ X_{5n} \ X_{6n}]$$

3.1.5 Préparation des données avant prédiction

Cette étape a été vue en détail dans la deuxième partie du mémoire. Les données utilisées pour la prédiction sont stockées dans le tableau « All Data » présenté en 2.1.2, mais cette forme n'est pas celle qui sera lue par les modèles mentionnés. En effet, ce tableau est exprimé sous la forme d'un dictionnaire, ce qui ne pose aucun problème pour les variables explicatives c'est-à-dire celles qui caractérisent la poudre. C'est le vecteur 1D de l'image, la variable dépendante que le modèle cherche à prédire (c'est-à-dire le flux, la précision ou le code d'erreur) et dont la structure doit être modifiée. Pour cela, la bibliothèque « scikit-

learn » met à la disposition des scientifiques l'outil « column_or_1d » qui permet de s'affranchir des erreurs de structures éventuelles lorsque les données entrées dans le modèle proviennent d'une base de données qui a été triée ou transformée auparavant.

3.2 CHOIX DE L'OUTIL LE PLUS EFFICACE

Parmi les modèles énoncés dans la section précédente, il s'agit maintenant de choisir le plus adapté et surtout le plus performant pour apprendre et prédire le comportement qui est le sujet de cette étude. Les modèles qui seront comparés et la manière dont ils manipulent les données ont été expliqués plus haut, cette partie va s'intéresser aux des erreurs d'apprentissage. Les erreurs de prédictions seront considérées plus loin.

L'erreur d'apprentissage apparaît lorsque le programme essaie de prédire le comportement d'une poudre de l'ensemble d'entraînement, qui a servi à ajuster le comportement du modèle. L'autre erreur est l'erreur de prédiction sur une poudre inconnue, c'est-à-dire l'erreur entre la valeur prédite et la valeur réelle pour une poudre qui n'a pas été utilisée par le programme pour se calibrer. Le modèle idéal est un programme qui minimise les deux erreurs mentionnées, c'est-à-dire qu'il évite le surapprentissage tout en étant efficace sur l'ensemble d'entraînement également. Compte tenu de la faible quantité de données, les erreurs d'apprentissage vont être étudiées seules et le choix du modèle se basera uniquement sur sa capacité à apprendre. Par la suite, les erreurs de prédiction seront étudiées pour vérifier que le programme est également performant sur des poudres inconnues.

3.2.1 Calcul des erreurs d'apprentissage des erreurs d'ensachage

Les erreurs d'apprentissage des modèles de régressions sont calculées par la fonction définissant le modèle, sous forme d'un coefficient de régression « r^2 ». Ce coefficient qui représente la norme euclidienne des erreurs va permettre d'effectuer un premier choix dans les modèles étudiés. Les premiers tests des modèles ont montré des performances très mauvaises avec seulement 8 poudres dans la base de données. Les modèles ne parvenaient

pas à apprendre le flux ou la précision des données : les coefficients « r^2 » de régression des modèles étaient inférieurs à 60 % pour tous les modèles.

C'est à la suite de ce constat qu'il a été décidé de séparer les données codées avec une erreur différente de « 1 » et de les isoler pour forcer leurs valeurs par la suite. Dans un premier temps il s'agit donc de réussir à prédire correctement des erreurs d'ensachage qui peuvent se produire. Pour prédire les classes d'erreurs, les trois modèles cités dans le Tableau 13 sont utilisés. Pour une poudre sélectionnée pour avoir un comportement complexe, le tableau suivant récapitule la prédiction des erreurs d'ensachage.

Grâce à ce genre de tableau, exporté sur un tableur pour observer la performance des prédictions de classification, il est possible de choisir le programme le plus performant. Ce choix s'effectue en calculant, pour toutes les poudres de la base de données, le nombre d'erreurs qui a été fait par chaque programme de prédiction. Le programme de prédiction le plus performant est ensuite sélectionné, sans se baser sur un coefficient de classification qui serait fourni par le modèle après son apprentissage. Ce choix par observation permet d'utiliser toutes les poudres dans l'ensemble d'apprentissage sauf celle qui est testée et donc de s'affranchir d'un ensemble de tests qui nécessiterait beaucoup plus de données pour calculer un score de classification. Le Tableau 15 illustre la prédiction d'une poudre complexe qui permet de montrer la performance globale de chaque programme. Il est frappant de voir que le modèle le moins adéquat se dégage assez rapidement. En effet, le modèle « logit » ne parvient pas à s'adapter pour reconnaître les erreurs de couple (codées - 1) pour l'ouverture M qui ont pourtant lieu dans la réalité et qui sont bien prédites par les deux autres modèles. De plus ce n'est pas le cas de toutes les poudres, mais celle du Tableau 15 présente la particularité de créer des erreurs de remplissage pour les deux grandes ouvertures et la vitesse maximale (9 rotations par seconde). C'est pour cette raison que cette poudre a été choisie pour illustrer les comportements des trois modèles de prédiction. Aucun des deux programmes n'a été capable de reconnaître le comportement strict de cette poudre en prédisant les deux erreurs codées « -2 ». Pourtant le modèle des K plus proches voisins (KPPV) parvient déjà à trouver une de ces deux erreurs, ce qui est positif pour la suite des

choses. Il est important de noter que seulement 2 poudres sont concernées par ce genre d'erreurs dans la base de données disponible pour les premiers essais, ce qui explique que le programme ne soit pas encore capable de les prédire.

Tableau 15 : Comparaison des prédictions des classes d'erreurs pour différents modèles

Ouverture	Vitesse (Rps)	Erreurs réelles	« Logit »	« Random Forest »	« K-neighbors »
S+M+L	4	1	1	1	1
S+M+L	5	1	1	1	1
S+M+L	6	1	1	1	1
S+M+L	8	1	1	1	1
S+M+L	9	-2	1	1	1
L	4	1	1	1	1
L	5	1	1	1	1
L	6	1	1	1	1
L	8	1	1	1	1
L	9	-2	1	1	-2
S+M	0,5	1	1	1	1
S+M	1	1	1	1	1
S+M	2	1	1	1	1
S+M	3	1	1	1	1
S+M	4	1	1	1	1
M	0,5	-1	1	-1	-1
M	1	-1	1	-1	-1
M	2	-1	1	-1	-1
M	3	-1	1	-1	-1
M	4	-1	1	-1	-1
S	0,5	-1	-1	-1	-1
S	1	-1	-1	-1	-1
S	2	-1	-1	-1	-1
S	3	-1	-1	-1	-1
S	4	-1	-1	-1	-1

Finalement, cette première étude permet de choisir le modèle de prédiction des classes d'erreurs qui devient donc pour toute la suite de l'étude le modèle KPPV.

3.2.2 Calcul des erreurs d'apprentissage pour le flux

Maintenant qu'une première partie du programme permet, grâce à un modèle de classification, de prédire les erreurs d'ensachage rencontrées, il s'agit de choisir le modèle de prédiction du flux d'ensachage. En effet la prédiction des erreurs d'ensachages sera utilisée pour adapter la prédiction du flux lorsqu'une erreur est prédite. Pour cela, une présélection des données est effectuée avant de les entrer dans le modèle de régression. Seules les configurations d'ensachage (ouverture et vitesse) qui n'ont abouti à aucune erreur sont prises en compte. Cela évite au programme de s'intéresser aux erreurs de la machine ou au manque de données pour se concentrer sur le comportement physique dans l'ensacheuse. Pour rappel, les modèles qui sont étudiés sont les 6 fonctions de régressions listées dans le tableau 13.

L'analyse des corrélations de la partie 1.5 a permis d'étudier l'impact linéaire des 6 propriétés des poudres sur le flux d'ensachage. Dans cette analyse, les coefficients de corrélation linéaires sont assez faibles ce qui ne permet pas de dégager une propriété plus importante que les autres de manière significative. Pour cette raison, aucune propriété n'est mise de côté dans la caractérisation des poudres, qui sont donc définies par 6 propriétés. Les premiers essais de régression ont montré l'importance de prendre en compte les 6 propriétés des poudres. Les coefficients de régression polynomiaux, calculés directement par les modèles testés à partir de leur apprentissage, pour les 5 modèles étudiés, sont tous situés entre 75 et 85 % avec la sélection actuelle des données. Ces coefficients sont répartis dans le tableau suivant.

Tableau 16 : Résumé des coefficients de régression pour les modèles de régression

Modèle	Coefficient de régression du polynôme
« RidgeCV »	0,749
« ElasticNetCV »	0,762
« BayesianRidge »	0,785
« RandomForest »	0,821
« K Nearest Neighbors »	0,843

Les coefficients de régression polynomiaux de ce tableau sont calculés par rapport aux prédictions que le modèle effectue sur l'ensemble d'entraînement. Cela signifie que le comportement réel des poudres utilisées par le modèle pour s'adapter n'est pas encore complètement restitué par la prédiction sur ces mêmes poudres. Ces 6 coefficients sont obtenus pour 8 poudres dans la base de données, comme pour la prédiction des codes d'erreurs, puisque les modèles ont été mis en place et testés en parallèle avec les essais dans la machine. Pour illustrer la comparaison entre les différents modèles par rapport au flux réellement mesuré dans la machine, le graphique suivant en donne un aperçu pour la même poudre que celle utilisée pour illustrer la prédiction des erreurs d'ensachage du Tableau 15.

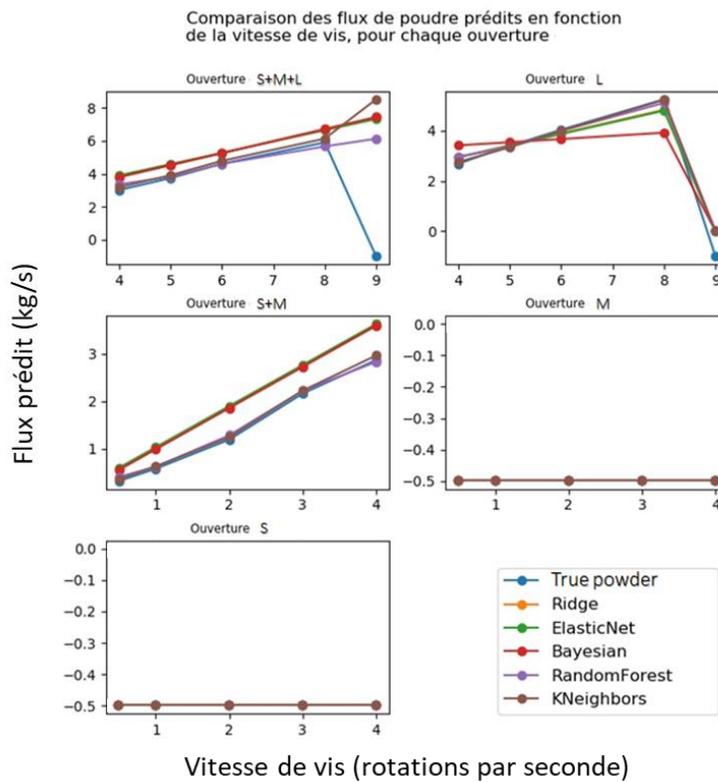


Figure 25 : Graphiques de comparaison des flux prédits par les 5 modèles et du réel

Le graphique ci-dessus représente, pour la même poudre que précédemment qui avait été sélectionnée pour son comportement difficile à prévoir, le flux d'ensachage en fonction de la vitesse de rotation de la vis, pour chaque ouverture étudiée et selon les 5 modèles de prédiction. Comme expliqué précédemment, les prédictions sont faites sur l'ensemble des données auxquelles les erreurs ont été retirées. Le programme de prédiction des erreurs d'ensachage est utilisé en amont, et pour les configurations où une erreur est prédite, la prédiction est forcée à -0,5 pour le flux. En effet, dans le chapitre 2, lors de la création de la base de données, l'erreur est codée « -1 » ou « -2 » et le flux réel affiché est donc « -0,5 » ou « -1 », car le remplissage s'effectue en deux secondes et la division est automatique dans le tableau qui gère les données. De plus, sur ce graphique les courbes apparaissent dans l'ordre de la légende, ce qui signifie que lorsqu'une seule courbe apparaît, toutes les courbes sont

égales et donc superposées. Cette méthode de prédiction permet d'obtenir avec seulement 8 poudres dans la base de données des résultats très encourageants.

Sur ce graphique, il est également possible d'observer les performances de prédiction par rapport à la courbe réelle. Il est alors possible de remarquer que les modèles utilisant la méthode de régression par les moindres carrés généralisés (« Ridge » et « ElasticNet ») ne sont pas capables de prédire le flux aussi bien que les autres fonctions (la courbe jaune correspondant au modèle « Ridge » est cachée par la courbe verte « ElasticNet » sur tous les graphiques). C'est également le cas du modèle qui utilise la méthode de Bayes (courbe rouge), qui a des difficultés à prédire le comportement atypique de cette poudre pour certaines ouvertures. Les deux meilleurs modèles, dont la prédiction s'approche le plus de la réalité, sont donc les deux derniers modèles : celui utilisant des arbres de décisions et celui utilisant les voisinages entre les poudres.

Il est important de préciser à ce stade de la comparaison que la poudre utilisée pour illustrer les performances d'apprentissage des différentes poudres a un comportement très atypique dans la machine. D'autres poudres de l'ensemble de données ne sont pas aussi spéciales et le modèle parvient donc beaucoup mieux à s'adapter à leur comportement. En effet comme cela a été mentionné, les prédictions utilisées pour les comparaisons sont effectuées sur l'ensemble d'entraînement par manque de données ce qui devrait aboutir à des résultats très proches de la réalité.

Finalement pour départager les deux derniers modèles pour la prédiction du flux, d'autres poudres sont ajoutées à la base de données, qui en contient maintenant 20, et il est alors possible d'utiliser quelques poudres en tant qu'ensemble de tests. Une boucle algorithmique sur la base de données est effectuée pour apprendre les données sans la poudre sélectionnée par la boucle, prédire le comportement de cette poudre qui est donc inconnue par le programme. La poudre en question est ensuite ajoutée à la base de données pour être prédite à nouveau et ainsi offrir un point de comparaison supplémentaire. Le graphique suivant montre la même poudre que précédemment qui a suivi ce processus.

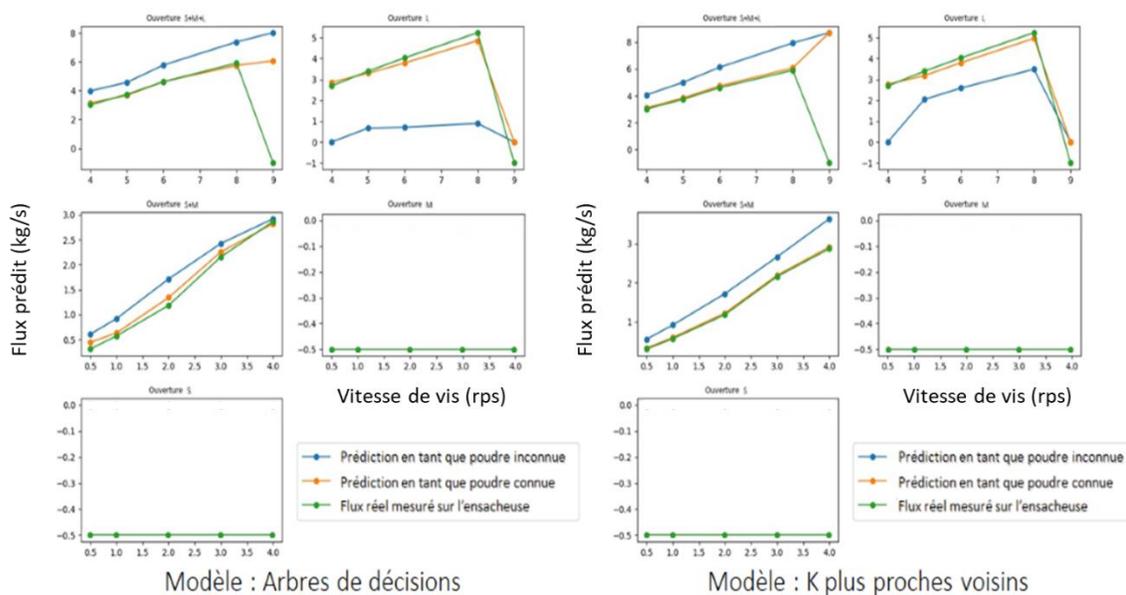


Figure 26 : Comparaison des flux prédits par deux modèles, pour la même poudre

Sur ce double graphique, la poudre étudiée est prédite une première fois alors qu'elle ne fait pas partie de l'ensemble d'entraînement, elle est alors inconnue du modèle, puis son flux est prédit alors qu'elle fait partie de l'ensemble d'entraînement pour tester la capacité du modèle à reconnaître une poudre connue. Ces prédictions sont comparées à la courbe réelle du flux de cette poudre dans la machine. La poudre étudiée est toujours la même que dans le Tableau 15 et la Figure 25, elle a donc la particularité de provoquer des erreurs de remplissage liées à un sac trop rempli pour les deux grandes ouvertures ainsi que des blocages de la vis de remplissage lorsque les ouvertures sont trop petites.

Il est intéressant de remarquer que comme c'est la seule poudre de la base de données à ce stade de son remplissage qui provoque des erreurs d'ensachage de type « -2 », créant un flux de -1 kg/s, aucun des deux modèles n'est capable de s'adapter à ce comportement. Il serait nécessaire de disposer de plusieurs poudres ayant ce type de comportement pour que le modèle puisse le détecter et le prédire. Il est également intéressant de remarquer que pour l'ouverture L les deux modèles, lorsque la poudre est inconnue, prédisent un flux beaucoup

plus faible que celui qui est mesuré en réalité. Cette différence peut s'expliquer par le fait que cette poudre a été sélectionnée à cause de sa différence avec les autres. En effet, c'est une des seules à produire une erreur d'ensachage car le sac est trop rempli. Le modèle s'adapte aux poudres qu'il a à sa disposition et comme le comportement de la poudre sélectionnée pour les illustrations est trop différent des autres, il ne prédit pas correctement son flux d'ensachage. Ce graphique, qui est créé pour toutes les poudres de la base de données individuellement, permet alors de choisir le modèle le plus adéquat : le réseau des k plus proches voisins. Ce choix s'effectue de manière graphique c'est-à-dire que pour toutes les poudres de la base de données à ce stade, la Figure 26 est créée et toutes ces images sont comparées manuellement pour choisir le meilleur modèle. C'est pour cette raison que le flux d'ensachage est tracé en fonction de la vitesse de la vis, afin d'avoir un axe commun peu importe la poudre qui est tracée. Les critères de choix appliqués sont les suivants :

- Lorsque la poudre est connue, le modèle parvient à prédire son flux le plus parfaitement possible, ce qui revient à observer une quasi-superposition des courbes vertes et jaunes.
- Lorsque la poudre est inconnue, le modèle doit être capable de prédire un flux proche de la réalité, c'est-à-dire que la courbe bleue doit être la plus proche possible de la courbe verte et avoir la même allure.

Le modèle le plus constant sur l'ensemble des poudres de la base de données et qui satisfait ces deux critères pour le plus grand nombre de poudres est le modèle des « k plus proches voisins ». Il permet autant une bonne prédiction de la prédiction du flux que la poudre soit connue ou non. Sur la figure 26, le modèle des arbres de décisions semble mieux satisfaire ces critères, mais sur l'ensemble des poudres de la base de données il est moins constant et donc moins performant.

3.2.3 Calcul des erreurs d'apprentissage pour la précision

La précision d'ensachage est le second indicateur de la performance de la poudre lors de son ensachage dans la machine. Dans un premier temps, la précision est prédite grâce aux 5 modèles utilisés pour la régression du flux de poudre. Or cette méthode n'a pas porté ses fruits : les erreurs sont très fréquentes et le programme ne parvient pas à reproduire le comportement de la poudre.

Cette observation vient principalement du fait que les valeurs de précisions sont très variables, et n'ont pas de sens de variation concret comme c'est le cas du flux qui augmente globalement avec l'augmentation de la vitesse de rotation de la vis. Le graphique ci-dessous montre clairement que ces modèles ne sont donc pas du tout adaptés à la prédiction de la précision d'ensachage, ou alors que c'est la définition de cette précision qui n'est pas bonne par rapport à ce qui est souhaité.

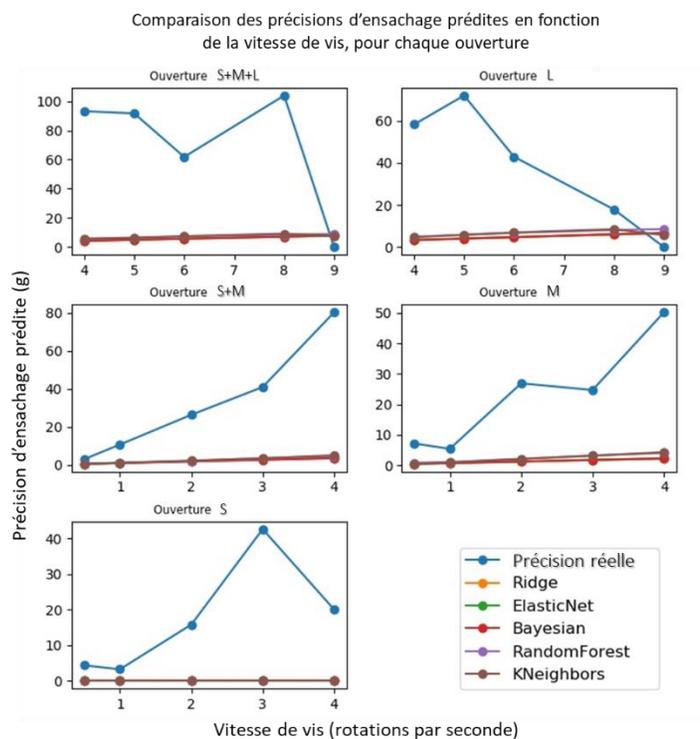


Figure 27 : Graphiques de comparaison des précisions prédites par les modèles

Même après l'ajout de plusieurs poudres dans la base de données, le programme ne parvient pas à progresser correctement pour aucun modèle. Il a donc été choisi de redéfinir complètement la vision de la précision d'ensachage. En effet, ce qui est nécessaire aux coordonnateurs responsables des essais et de la performance vis-à-vis du client, c'est l'intervalle de précision dans lequel se situe l'ensachage. Il faut donc que le programme prédise la pire précision atteignable par la poudre en question selon les configurations de la machine. Les modèles de régression n'étant pas du tout adaptés à cette fonction comportementale, il a donc été décidé de créer des niveaux de précision, et de prédire ces niveaux. Ainsi la variable continue qu'était la précision se transforme en variable catégorielle, répartie sur plusieurs niveaux. Dans un premier temps, peu de niveaux et donc peu d'intervalles seront utilisés afin de faciliter le travail du programme. Le modèle employé ne sera donc plus un modèle de régression, mais un modèle de classification, comme pour les erreurs d'ensachage.

Après une rapide étude graphique de la distribution des valeurs de la précision, la première liste des niveaux mis en place est la suivante : [0, 5, 10, 20, 30, 50, 100, 200] c'est-à-dire 8 valeurs de précision d'ensachage, en grammes, parmi lesquelles les valeurs réelles seront rangées. Ces 8 valeurs définissent des classes qui représentent la précision arrondie à la valeur supérieure existant dans cette liste. Par exemple pour une précision réelle de 35 grammes, cette valeur sera classée comme inférieure à 50. En reconnaissant ce comportement, le modèle de classification prédira une précision de 50 grammes. Cela permet au scientifique analysant les résultats de savoir que la précision prédite de 50 grammes est une prédiction arrondie et que la précision réelle sera inférieure ou égale à cette valeur. Comme pour la régression du flux d'ensachage, la prédiction du classificateur est effectuée pour la poudre étudiée en tant que poudre inconnue et également en tant que poudre connue pour les comparer à la réalité. Le modèle de classification choisi est le modèle des « k plus proches voisins », car c'est le seul modèle qui parvient à fournir un classement correct lorsque

la poudre est connue. La poudre observée est toujours la même que pour les illustrations précédentes.

Le graphique ci-dessous permet d'observer que le programme de classification a toujours des difficultés à apprendre correctement la précision d'ensachage. Pourtant grâce à la modification de point de vue qui a été faite, le modèle réussit à s'adapter à ce comportement puisque la courbe jaune se retrouve très proche de la courbe verte qui représente la réalité ici. On remarque également que, comme le voulait le système de classification employé, la courbe de prédiction lorsque la poudre est connue est quasiment toujours supérieure à la courbe réelle, ce qui permet de prévoir une précision qui ne sera normalement pas plus grande que la valeur prédite. En effet, le modèle peut prédire une précision de 100 grammes alors que la réalité serait une précision de 50 grammes, mais cela n'est pas si grave puisque la précision réelle sera meilleure que celle annoncée à l'utilisateur de la machine.

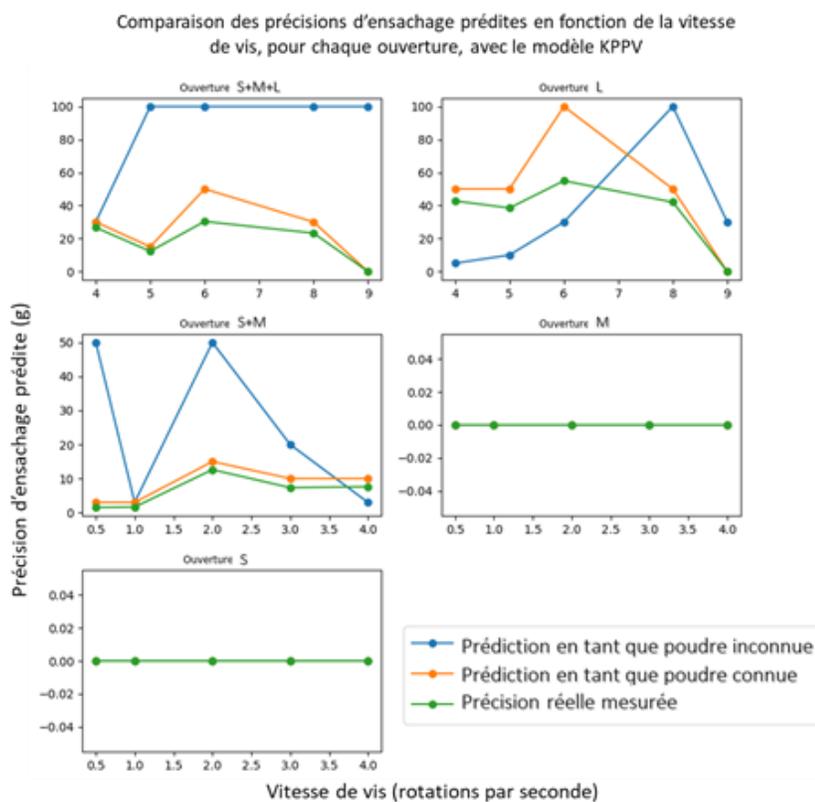


Figure 28 : Graphiques des précisions prédites par le modèle KPPV

Avec cette définition des précisions, le meilleur modèle est le modèle de classification par les k plus proches voisins, comme pour la classification des erreurs d'ensachage. Il est important de noter que pour toutes les configurations d'ensachage où une erreur est prédite, la précision est elle aussi forcée à 0 pour permettre une prédiction plus proche de la réalité. La classification des erreurs d'ensachage est donc également utilisée pour la classification de la prédiction d'ensachage afin de la compléter et de l'ajuster.

Après avoir ajouté de nouvelles poudres à la base de données, dont les précisions obtenues dépassaient les limites de la liste de valeurs précédentes qui définissaient les classes de prédiction, la liste de niveaux de précisions a été mise à jour afin de s'affranchir de la dépendance par rapport à la distribution des précisions des poudres connues. La liste des classes de prédiction, en grammes, se base sur des précisions qui sont un seuil de qualité du sac rempli par le client. La liste [0, 120, 240, 360, 500, 1000] permet de classer les précisions de manière plus franche. La prédiction devient moins précise pour les précisions inférieures à 200 grammes, mais permet de donner une information plus graduelle jusqu'au kilogramme. En effet à partir d'un kilogramme de précision d'ensachage, la précision est considérée comme très mauvaise et il est préférable de ne pas faire fonctionner la machine dans cette configuration pour obtenir un sac rempli au poids souhaité.

Cette dernière analyse met fin à la sélection des modèles de prédiction. Finalement que ce soit pour la classification ou pour la régression, c'est le modèle de résolution par la méthode des k plus proches voisins qui est sélectionné à chaque fois, et les trois modèles KPPV utilisés fonctionnent avec un algorithme de validation croisée qui permet de sélectionner le meilleur nombre de voisins, comme cela a été présenté en 3.1.2.

3.3 COMPARAISON ENTRE LA PRÉDICTION ET LES POUDRES SIMILAIRES

Le modèle de prédiction a été choisi, et avec lui il a été possible d'observer la manière dont les données étaient manipulées dans le programme pour parvenir à une prédiction globale qui ait un sens et qui soit relativement proche de la réalité. Le programme est amené à toujours apprendre le comportement des données à chaque nouveau calcul de prédiction, car tant que le nombre de poudres est faible, il est préférable de fonctionner de cette manière. Lorsque la base de données sera plus conséquente, il sera plus judicieux de stocker le modèle qui se sera au préalable adapté aux données à chaque nouvel ajout pour éviter qu'il s'adapte à chaque calcul de prédiction comme c'est le cas actuellement. Le bon fonctionnement du programme avec peu de données est tout de même très encourageant, et permet d'aller de l'avant en mesurant plus de poudres pour le rendre encore plus efficace.

3.3.1 Processus de prédiction final

Finalement, avec les modèles choisis et la manière dont le code manipule les vecteurs de données pour prédire le comportement de la poudre, le processus de prédiction est illustré dans la figure suivante.

Sur ce diagramme, l'apparition d'un élément est importante à présenter : l'introduction des vitesses intermédiaires. En effet, les prédictions montrées précédemment (lors du choix du modèle) sont faites pour chaque ouverture et chaque vitesse de vis utilisée pour la mesure des données. Or le moteur de la vis ne fonctionne pas uniquement sur ces valeurs de vitesse, il est donc nécessaire de pouvoir prédire le comportement de la poudre sur les vitesses intermédiaires également. En effet, le moteur de la machine peut être réglé à 0,1 rotation par seconde près et il serait donc pratique de pouvoir prédire le comportement des poudres pour toutes ces valeurs de vitesses intermédiaires. Pour cela le nombre de lignes du tableau des variables prédictives est considérablement allongé pour contenir toutes les lignes supplémentaires de chaque ouverture, pour chaque poudre. Ces valeurs vont permettre

d'interpoler la prédiction afin de pouvoir utiliser les prédictions pour plus de vitesses différentes. Le flux et la précision d'ensachage ne sont pas mesurés pour toutes ces valeurs et l'interpolation se fait sur les prédictions qui ont été faites sur les 5 vitesses utilisées jusqu'ici. Pour les ouvertures faibles, les vitesses ajoutées sont toutes celles entre 0,5 et 4 rotations par seconde par pas de 0,1 qui n'étaient pas déjà présentes. Pour les ouvertures plus grandes, ce sont toutes les vitesses entre 4 et 9 rotations par seconde par pas de 0,1 également. Or le modèle des « k plus proches voisins » n'est performant que sur des variables d'entrée qui ont la même forme que celles de son ensemble d'entraînement et conduit à des prédictions de flux incohérentes. En revanche les prédictions des classes d'erreurs et des niveaux de précisions fonctionnent bien même avec les vitesses supplémentaires prises en compte.

La solution adoptée pour garder la puissance du modèle KPPV tout en permettant de prédire les indicateurs de l'ensachage sur le domaine complet des vitesses possibles est d'effectuer la prédiction du flux en deux étapes. La première étape s'effectue sur l'ensemble des vitesses mesurées, où le modèle KPPV fonctionne très bien, comme cela a été vu en 3.2. Ensuite, le tableau étendu avec les vitesses intermédiaires qui représente mieux l'utilisation possible du moteur de la vis est utilisé pour ajuster la prédiction du flux d'ensachage. Pour cela, un nouveau modèle de prédiction est utilisé, le modèle « RidgeCV », du module « linear_model » de la bibliothèque « scikit-learn » [21], car il permet de lisser la prédiction d'une fonction de points épars sur des points intermédiaires. Une rapide observation du flux en fonction de la vitesse de la vis permet de constater l'intérêt d'intégrer aux variables d'entrées de cette seconde prédiction le carré et le cube de la vitesse de la vis. La nouvelle prédiction s'appuie donc sur un modèle polynomial dont les variables d'entrées sont constituées des résultats de la prédiction par le modèle KPPV et de la vitesse au carré et au cube. Tout ce processus est synthétisé par le processus de la Figure 29.

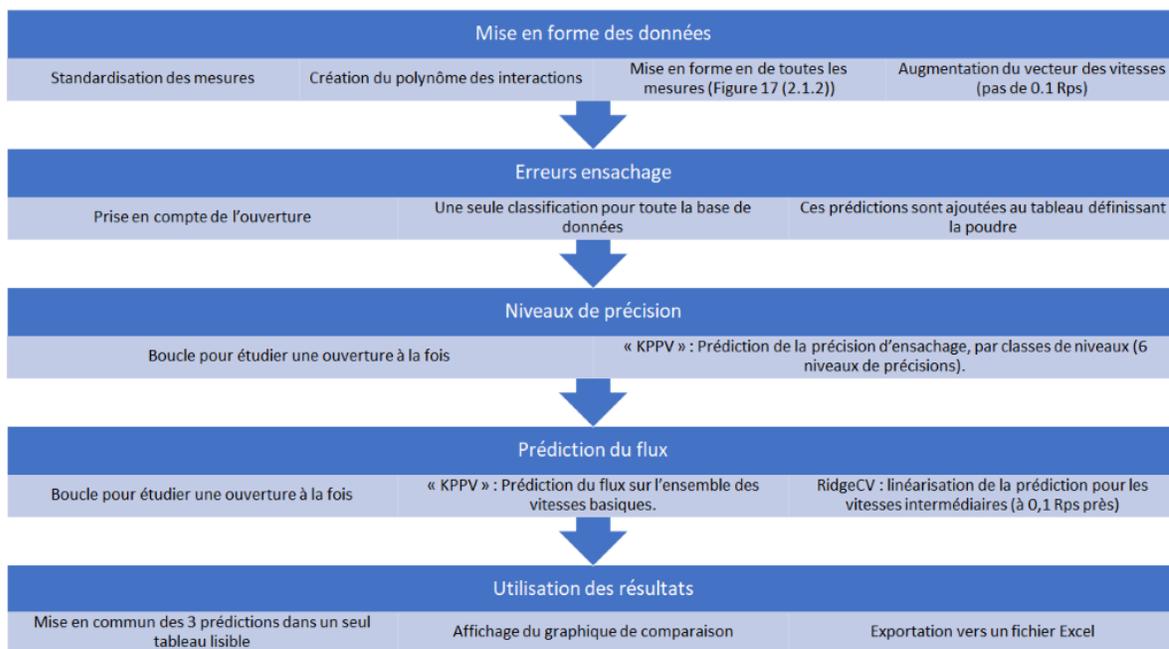


Figure 29 : Algorithme du processus de prédiction final dans l'application

L'image ci-dessous montre le rendu du graphique de prédiction par rapport à la réalité pour une poudre de la base de données qui est connue, c'est-à-dire que le programme est capable de la reconnaître et de prédire son comportement avec beaucoup de fiabilité. Cet ensemble de graphiques permet de vérifier que l'interpolation sur les points intermédiaires colle bien à la courbe de comportement réel, mesuré en des points stratégiques (5 vitesses). Cette figure permet notamment de vérifier que l'interpolation ne provoque aucune oscillation du modèle de prédiction entre les points mesurés.

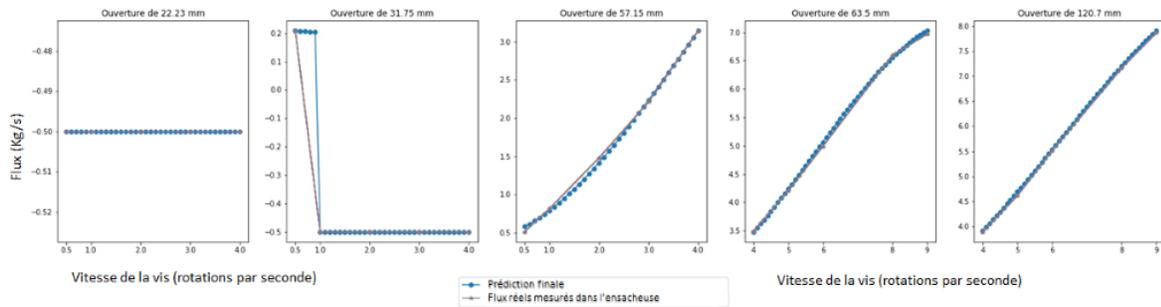


Figure 30 : Graphiques du flux prédit pour toutes les vitesses à 0,1 Rps près

Dans le programme final, lorsque des erreurs sont détectées, le flux est forcé à la valeur prise par la mesure à la place de « 0 ». Cela permet une analyse visuelle sur ce graphique plus simple et plus directe. Dans le programme final, une modification est également faite pour éviter le surapprentissage des données. En effet avec l'algorithme de validation croisée du nombre de voisins à prendre en compte, le programme avait tendance à prendre trop de voisins puisque l'étude était faite avec le nombre maximal de voisins possibles. La liste du nombre de voisins possibles est donc réduite et le programme doit maintenant choisir entre 1, 2, 3, 4 ou 5 voisins à prendre en compte. Cela permet d'éviter la surperformance du programme sur son ensemble d'entraînement qui diminue sa performance de prédiction sur des poudres inconnues.

Enfin sur le diagramme représentant le processus de la prédiction, la dernière étape mentionne trois utilisations distinctes des valeurs prédites :

1. La création d'un tableau récapitulatif
2. L'affichage sur un graphique de comparaison
3. L'exportation du tableau

La première étape, la création du tableau, permet de regrouper les prédictions des erreurs, des précisions et des flux dans un même dictionnaire multidimensionnel. Cette mise en forme permet d'avoir accès très facilement aux données grâce aux requêtes de données

possibles avec les objets de la bibliothèque « pandas » [20]. Comme la prédiction est effectuée sur 86 vitesses en tout, et ce sur 5 ouvertures, le tableau est assez grand. Néanmoins, la structure utilisée pour stocker ces données est la suivante illustrée par la Figure 31.

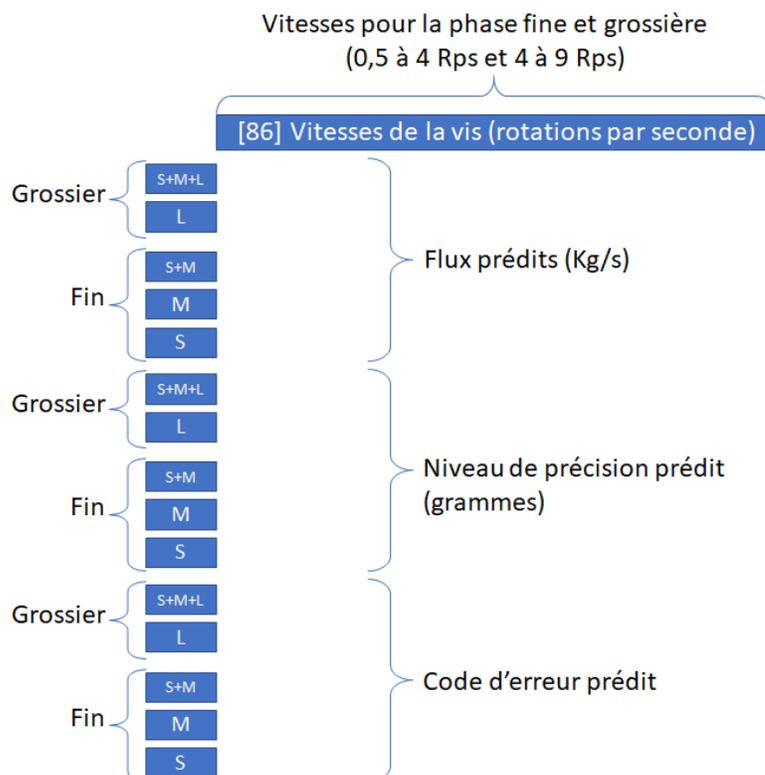


Figure 31 : Structure du tableau récapitulatif de toutes les prédictions

Ce tableau est donc exporté vers un fichier de tableur pour être ensuite utilisé par le fichier de calcul de la recette d'ensilage. Ce tableau va également permettre de construire le graphique de comparaison des prédictions, observable directement dans l'application.

3.3.2 Comparaison de la prédiction par rapport à la réalité

Les données du tableau dont la structure est donnée par la figure précédente sont des prédictions directes du programme. Or ces prédictions sont seulement des nombres, que l'ordinateur calcule grâce à plusieurs modèles complexes, mais il s'agit de confronter ces prédictions numériques à ce qui se passe réellement.

Le but premier de ce programme de prédictions est d'éviter d'avoir à mesurer les poudres inconnues, qui n'ont jamais été ensachées, afin de gagner beaucoup de temps et d'argent. Le problème est que pour les poudres inconnues il n'y a pas de vérification possible des valeurs prédites. Les modèles de prédictions se basent sur les poudres connues, qui ont été mesurées dans l'ensacheuse, et donc les erreurs de prédictions sur ces poudres sont calculables même si comme cela a été vu elles sont très faibles. Il serait donc intéressant de pouvoir confronter les valeurs prédites pour les poudres inconnues.

L'outil de comparaison des poudres par la recherche de leurs poudres similaires, qui a été vu en 2.4.2, va être à nouveau utilisé ici. Cet outil permet de trouver les 7 poudres dont le comportement rhéologique dans les appareils de caractérisation est très semblable. Il permet également de connaître le pourcentage de similitude entre les poudres trouvées et la poudre actuellement étudiée dans l'application dédiée. Pour confronter les prédictions à la réalité, les deux outils vont donc être combinés dans un graphique dont voici un exemple, pour la poudre fictive étudiée à la fin du chapitre 2.

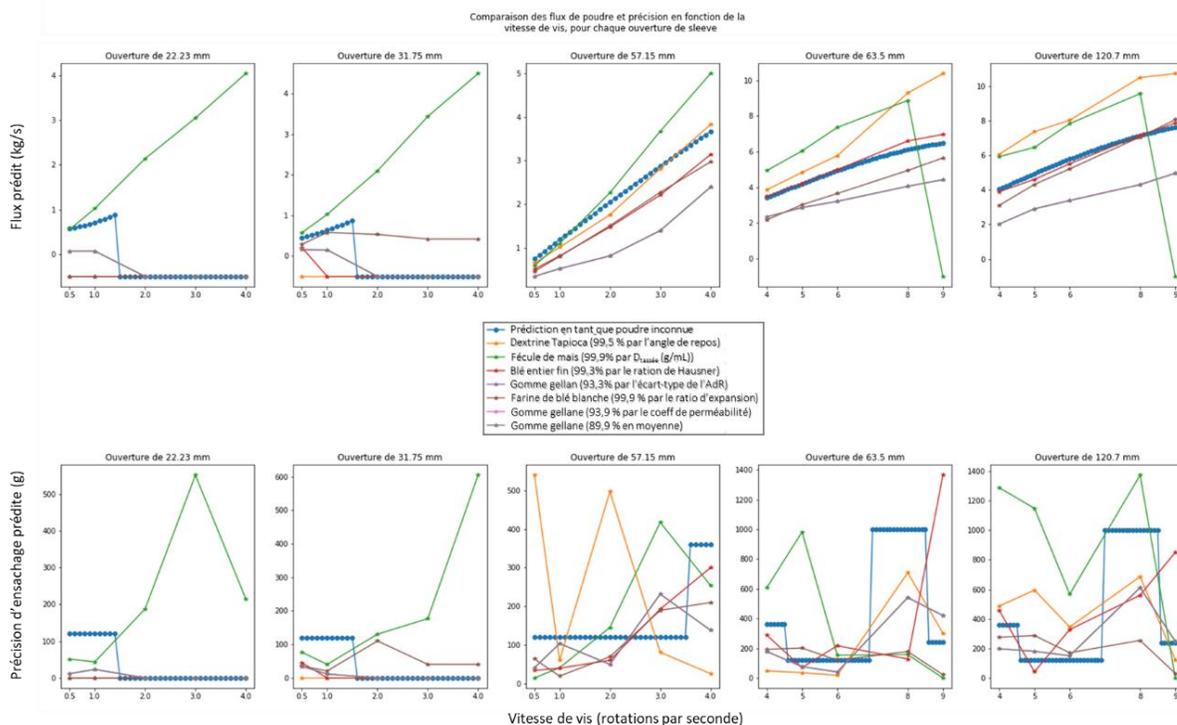


Figure 32 : Combinaison des graphiques de comparaison des prédictions

Sur ce graphique de comparaison des prédictions, on retrouve une légende au centre qui permet d'identifier chaque courbe de couleur. La première est toujours la prédiction faite sur la poudre inconnue, et les courbes suivantes sont les poudres similaires trouvées par la fonction développée pour cette application (voir section 2.4.2). Sur ce graphique, la première ligne montre le flux de poudre en fonction de la vitesse de rotation de la vis et la seconde ligne de graphiques montre la précision d'ensachage en fonction également de la vitesse de la vis. Les prédictions sont complètement indépendantes du calcul des pourcentages de similarités, mais le modèle des « k plus proches voisins » utilise une distance multidimensionnelle entre les poudres pour sélectionner celles qui sont les plus proches voisins de la poudre étudiée. Chaque poudre voisine sélectionnée par le modèle sera alors utilisée pour effectuer la prédiction en fonction de son comportement connu dans la machine pour prédire le comportement de la poudre inconnue. Le modèle des KPPV est donc non seulement le plus performant parmi ceux testés dans la section précédente, mais c'est

également un modèle qui est très proche de ce qu'un humain ferait pour analyser les poudres, et finalement de ce qui est fait lors de la recherche des similarités entre les poudres.

Ce graphique, en combinant l'approche prédictive et l'approche comparative, permet de confronter la prédiction numérique avec les poudres connues. Il est donc possible d'observer pour chaque zone d'intérêt si les erreurs prédites (forçage à 0 ou à des valeurs négatives) se retrouvent également pour les poudres similaires. Il est également possible d'observer les flux maximaux possibles en fonction notamment de la similarité avec la densité compactée par exemple. Beaucoup de vérifications sont possibles grâce à ce graphique qui en fait un outil incontournable. En effet, il permet de dégager une idée générale du comportement d'une nouvelle poudre grâce aux courbes de prédictions tout en permettant de visualiser les comportements des poudres similaires.

Cet exemple d'analyse permet également de montrer la difficulté rencontrée par le programme pour prédire correctement les niveaux de précisions. Il est en effet possible d'observer les courbes assez aléatoires des poudres connues qui conduisent à un apprentissage très difficile par le programme. La mise en place de niveaux permet d'avoir une prédiction un peu plus fiable qu'auparavant, mais donc moins précise. Néanmoins, l'utilité de la précision n'est pas aussi importante pour les grandes ouvertures où elle est vraiment mauvaise que pour les petites ouvertures, où elle est bien meilleure. En effet, c'est avec ces ouvertures-là que le remplissage fin est effectué et ce sont donc ces valeurs qui seront importantes pour avoir une bonne précision de la quantité de poudre ensachée.

3.3.3 Utilisation des prédictions pour construire une recette

Après la validation de la prédiction grâce au graphique précédent, il est possible d'utiliser encore une fois le tableau des prédictions. Ce dernier outil est l'apologie de l'analyse de la poudre inconnue puisqu'il permet de créer pas à pas une séquence, ou recette, d'ensachage. Cette séquence contient les ouvertures et les vitesses de vis disponibles et au

fur et à mesure de leur choix, l'outil calcule le poids final du sac, sa précision de remplissage et le temps nécessaire pour ensacher un sac.

Cet outil prend la forme d'une feuille de tableur dans un fichier dédié qui est accessible directement via l'application en un clic grâce à un bouton. Ce fichier est complètement différent de celui exporté par le programme qui contient le tableau récapitulatif des prédictions. En effet le module « pandas » qui permet l'exportation directe d'un dictionnaire dans un tableur écrase le contenu du tableur s'il existait. Or l'outil de calcul de la séquence d'ensachage se base complètement sur ces prédictions, il est donc nécessaire de récupérer ces informations. Pour cela, une macro VBA est créée pour récupérer les prédictions et les stocker dans une seconde feuille dans le fichier de la recette. Cette macro est nécessaire, car elle permet de modifier le fichier en créant une nouvelle feuille avec les données récupérées et en supprimant la feuille des données précédentes. Le simple clic sur le bouton de la feuille de recette exécute cette macro et permet d'éviter la manipulation du fichier par l'utilisateur pour lui faciliter l'utilisation du fichier.

La feuille du tableur effectue toutes ces actions de manière automatique afin d'empêcher les erreurs de manipulation possibles si l'utilisateur devait effectuer toutes ces étapes manuellement. De plus, cela permet de pouvoir manipuler l'outil de création de recettes sans disposer d'une connaissance profonde des logiciels de tableurs ou de la manipulation des données par l'application.

L'outil de calcul de recette permet donc de calculer les indices de performance spécifiques à ce procédé qui sont la précision d'ensachage et le temps total pour parvenir au poids de poudre souhaité. La forme que prend cet outil est illustrée par la capture d'écran suivante.

RECETTE de Remplissage d'un sac :							Nom de la feuille contenant les données : PredictionsImports					
Quantité visée (Kg) :	25	25	Seule la précision en 'Fine' est encadrée car c'est elle qui détermine la précision finale du remplissage				Récupérer les valeurs de la prédiction					
Quantité visée (Lbs) :		55,115575										
							Intervalle (poids en Kg)		Intervalle (poids en Lbs)			
	Time (s)	Opening	Speed	Flow	Qty (Kg)	Precision (g)	M- (pire)	M+ (pire)	M- (pire)	M+ (pire)	Cumul. Time(s)	
	Grossier	2	120,7	9	7,618	15,237	240	14,997	15,477	33,062	34,120	2
	Transitoire	0,5	120,7	8,6	7,447	3,723	240	18,480	19,440	40,742	42,858	2,5
		0,5	120,7	5,7	5,537	2,768	120	21,129	22,329	46,581	49,226	3
		0,5	57,15	3,6	3,357	1,678	360	22,447	24,367	49,487	53,720	3,5
		0,5	31,75	1,4	0,826	0,413	120	22,740	24,900	50,133	54,895	4
	Fin	2	31,75	0,9	0,597	1,194	120	24,895	25,135	54,883	55,412	6
	Modification du temps du mode fine pour atteindre la consigne (sec) :							3,78	0,17			
	Powder Name		Kg, ±g	Lbs, ± Oz	Temps (sec)	Pire temps de remplissage	Meilleur temps de remplissage					
	Total poids prédit :		25,015	55,148	6	7,78	4,17					
	Précision prédite :		± 120	4,23288								

Figure 33 : Capture d'écran de la feuille du calcul de la séquence d'ensachage

La feuille se met à jour automatiquement pour aller chercher les valeurs prédites correspondantes aux configurations de vitesse et d'ouverture choisies. Avec le flux de matière, le temps alloué à chaque mode et la précision prédite, la feuille calcule les intervalles du poids du sac à chaque étape en kilogrammes et en livres. Si le poids de consigne est dépassé par l'intervalle supérieur avant la dernière étape la case devient rouge pour alerter l'utilisateur. Juste avant la dernière étape, dans le processus de remplissage réel de la machine, le sac est pesé ce qui réinitialise le poids du sac juste avant le remplissage de précision. Dans l'outil de création de la recette, ce phénomène est reproduit par le calcul de poids minimal et maximal de la dernière étape puisque ce calcul prend uniquement en compte la précision du remplissage final pour ce calcul. Avant la dernière étape également, la feuille récupère le poids inférieur et supérieur de l'intervalle et calcule le temps nécessaire pour atteindre la quantité visée avec l'ouverture et la vitesse choisie à la dernière étape. Ces deux cases, situées en dehors des lignes du processus d'ensachage, permettent donc de connaître le meilleur et le pire temps de remplissage auxquels il faut s'attendre avec cette poudre dans les conditions choisies pour la séquence d'ensachage. Enfin un tableau récapitule les indicateurs principaux. Il est alors possible de répéter les étapes 3 à 5 pour adapter la séquence et atteindre de meilleurs scores de précision et de temps.

À propos de l'étape transitoire, elle intervient en plus des étapes classiques connues depuis le début de ce mémoire, car elle va marquer la transition entre les deux étapes principales. En effet, lorsque le remplissage de la phase grossière est terminé (2 secondes sur l'illustration à la Figure 33) l'ouverture va se réduire et la vis va ralentir sa rotation pour atteindre le mode de remplissage précis. Pendant la réduction de l'ouverture et de la vitesse, la poudre continue de se déverser et il est donc nécessaire de considérer cette phase pour une prédiction la plus proche possible de la réalité.

Le calcul de la séquence d'ensachage a plusieurs avantages. Premièrement, il permet, de manière bien plus rapide, de tester plusieurs recettes virtuellement donc sans avoir besoin de la grande quantité de poudre nécessaire à effectuer les tests dans l'ensacheuse. Cet outil peut donc permettre de préparer quelques séquences d'intérêt et une fois les derniers réglages chez le client, choisir la meilleure recette en les essayant avec le produit. Deuxièmement, elle permet d'observer les précisions et les temps nécessaires à l'ensachage d'une poudre lors de la préparation de la soumission au client. Dans le cas où des essais réels seraient tout de même indispensables avant la vente de la machine, cet outil permettra de gagner beaucoup de temps en effectuant quelques simulations au préalable pour simplement valider les meilleures séquences avec le produit dans la réalité.

Dans les trois cas, cet outil présente un intérêt non négligeable et permet de gagner du temps tout en ayant une bien meilleure connaissance du processus d'ensachage dans la machine. Néanmoins il repose entièrement sur la fiabilité du modèle de prédiction. Le fait de remplir la base de données va permettre au modèle d'être de plus en plus performant et de faire des prédictions de plus en plus fiables.

3.4 SCORES DE PRÉDICTIONS ET ÉVOLUTIVITÉ DE L'APPRENTISSAGE

Le programme complet de prédiction a été présenté dans les sections précédentes. Comme cela a été mentionné, sa fiabilité repose sur sa capacité à apprendre correctement le comportement des poudres. Il est donc intéressant de savoir comment le modèle se comporte vis-à-vis des données que ce soit pour prédire des poudres qu'il ne connaît pas ou des poudres très proches de celles qui lui ont servi d'entraînement. Comme lors du choix des modèles, il est donc nécessaire de calculer les scores de prédictions des trois modèles utilisés par le programme de l'application. À titre de rappel, deux modèles de classification permettent de prédire les erreurs d'ensachage et les précisions atteignables et un modèle de régression permet de prédire les flux d'ensachage. Pour pouvoir comparer tous les modèles de prédictions, que ce soit de la classification ou de la régression, des scores de prédiction sous forme de pourcentages seront utilisés.

La figure 34 montre le processus de calcul des erreurs pour chaque poudre, pour chaque configuration de la machine. Une moyenne des 25 pourcentages (il y a un score pour chaque poudre, exprimé en pourcentage) pour chaque poudre est calculée et définit alors le score de prédiction sur 100 de cette poudre. Le même processus est utilisé dans les deux analyses qui seront présentées ci-dessous.

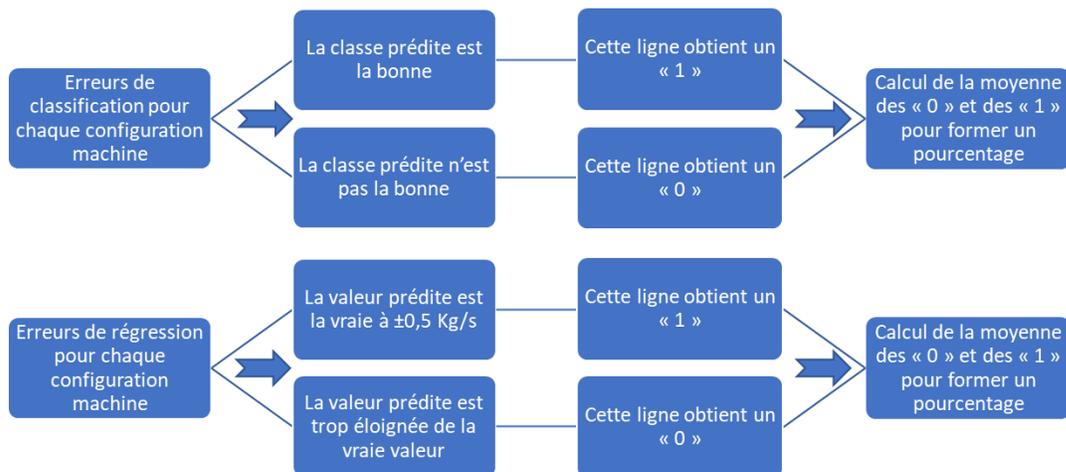


Figure 34 : Organigramme du processus de calcul des scores de prédiction (%)

3.4.1 Scores de prédiction pour chaque poudre

La première analyse des prédictions se présente sous la forme du Tableau 17 qui contient tous les pourcentages moyens des erreurs, pour toutes les poudres de la base de données. Ce tableau est séparé en 3 groupes de colonnes : une pour chaque propriété de l'ensachage prédite (erreurs, précisions et flux). Pour chaque groupe, 2 colonnes contiennent les pourcentages selon différentes situations.

- La colonne « poudre inconnue » contient les pourcentages de prédictions correctes lorsque la poudre n'est pas dans la base de données. Elle compare cette prédiction à la valeur réelle mesurée dans la machine.
- La colonne « poudre connue » contient les pourcentages de prédictions correctes lorsque la poudre est dans la base de données, par rapport à sa vraie valeur.

Grâce à ces deux pourcentages pour chaque poudre, il est possible d'observer la performance globale du programme. Une moyenne des pourcentages est calculée pour connaître le score global du programme complet, toutes poudres confondues, à la dernière ligne du Tableau 17. La marge d'erreur choisie est arbitraire et influe complètement sur les scores du modèle de prédiction des flux, mais 0,5 kg/s semble être une précision acceptable pour une première étude sur le sujet et compte tenu du fait que ce sont surtout les flux à haute vitesse qui seront déterminants pour la rapidité de l'ensachage. La marge d'erreur de 100 grammes utilisée pour la prédiction des précisions d'ensachage est choisie pour être inférieure au premier niveau de classification (pour rappel, les précisions sont classées parmi les valeurs de la liste [0, 120, 240, 360, 500, 1000]).

Tableau 17 : Résumé des pourcentages de prédictions correctes

Type de poudre	Codes d'erreurs prédits correctement (%)		Flux prédits correctement à 0,5 kg/s près (%)		Précisions prédites correctement à 100 g près (%)	
	Poudre inconnue	Poudre connue	Poudre inconnue	Poudre connue	Poudre inconnue	Poudre connue

Farine blanche	94,8 %	100,0 %	52,0 %	100,0 %	29,0 %	76,6 %
Protéine lait	71,0 %	71,4 %	20,0 %	100,0 %	53,5 %	72,5 %
Farine blanche	88,1 %	88,1 %	52,0 %	100,0 %	68,1 %	70,1 %
Lait	82,9%	100,0%	44,0%	100,0%	42,5%	47,0%
Lactosérum	71,0 %	80,5 %	32,0 %	100,0 %	27,8 %	40,6 %
Soya	89,0 %	89,1 %	24,0 %	100,0 %	67,9 %	68,9 %
Fécule maïs	93,1 %	91,7 %	48,0 %	100,0 %	83,9 %	89,1 %
Tapioca	94,8 %	100,0 %	64,0 %	100,0 %	45,7 %	51,9 %
Fécule maïs	73,1 %	73,0 %	16,0 %	100,0 %	37,1 %	29,5 %
Fécule maïs	81,0 %	80,0 %	56,0 %	100,0 %	54,5 %	64,8 %
Fécule patate	79,2 %	78,9 %	20,0 %	100,0 %	27,2 %	32,8 %
Fécule maïs	85,0 %	89,7 %	80,0 %	100,0 %	48,8 %	61,6 %
Blé entier	81,5 %	95,1 %	40,0 %	100,0 %	39,0 %	54,0 %
Bicarbonate	74,7 %	78,3 %	44,0 %	100,0 %	35,0 %	48,1 %
Magnésium	71,0 %	73,6 %	44,0 %	92,0 %	29,8 %	36,4 %
Son de blé	85,9 %	91,7 %	40,0 %	100,0 %	56,2 %	79,5 %
Blé concassé	84,3 %	84,8 %	56,0 %	100,0 %	42,0 %	47,6 %
Xanthane	84,4 %	84,8 %	56,0 %	100,0 %	65,8 %	55,2 %
Gellane	87,0 %	91,7 %	48,0 %	100,0 %	40,1 %	68,3 %
Farine mixte	90,8 %	92,2 %	76,0 %	100,0 %	71,0 %	70,2 %
Moyenne	83,2 %	85,9 %	45,4 %	99,6 %	50,1 %	59,8 %

Ce tableau permet de voir que certains types de poudres sont plus faciles à prédire que d'autres. En effet même sans que la poudre soit dans la base de données, certaines poudres sont prédites correctement à plus de 80 %, par exemple la farine mixte qui a les plus hauts scores. En revanche les modèles éprouvent beaucoup de difficultés à prédire le comportement de certaines poudres, notamment les féculs de maïs ou le blé entier.

La dernière ligne qui présente le score moyen du programme est un bon indicateur de sa performance :

- Pour la prédiction des erreurs d'ensachage, le programme est assez performant puisqu'il prédit la bonne erreur à 83 % pour une poudre inconnue et à 86 % pour une poudre connue.
- Pour la prédiction des flux, le programme est très performant sur son ensemble d'entraînement puisqu'il atteint 100 % très souvent. Lorsque la poudre est inconnue en revanche, il est beaucoup moins performant puisque son pourcentage moyen est très faible, notamment à cause des quelques poudres très mal prédites.
- Pour la prédiction des précisions, le programme produit étonnamment un assez bon résultat.

Le Tableau 17, et en particulier la ligne de la moyenne, est un bon indicateur de la fiabilité et de la performance du programme dans l'état actuel de la base de données et des choix de modèles qui ont été faits. Le pourcentage assez faible de 45 % des flux correctement prédits est à nuancer : la base de données a été construite pour cette étude et elle contient encore un nombre de poudres assez faible. De plus dans l'optique de partir sur des bases solides dans ce projet, un soin particulier a été porté à étudier le plus possible des poudres très différentes. En effet compte tenu du temps alloué aux mesures il était important de mesurer des poudres très différentes pour avoir une vision large de l'ensemble des poudres étudiables. Il est donc normal que certaines poudres donnent beaucoup de difficultés au programme à cause de leurs singularités.

3.4.2 Évolution du programme de prédiction

Dans l'analyse des scores précédente, le programme utilise toute la base de données, sauf éventuellement la poudre concernée. Cela permet d'observer la fiabilité actuelle des prédictions, mais quand est-il de leur évolution au fil du remplissage de la base de données ?

Pour étudier l'évolution du programme lorsque la base de données se remplit, l'algorithme employé est le suivant.

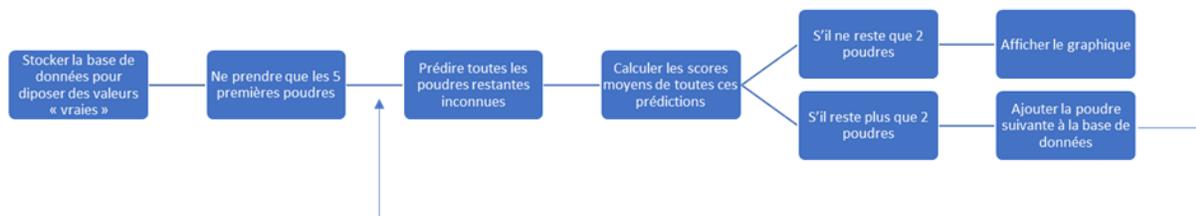


Figure 35 : Processus de calcul de l'évolution du programme au fil du remplissage

Cet algorithme permet de remplir petit à petit la base de données utilisée pour les prédictions. Au début, 5 poudres sont prises en compte et les 15 restantes sont prédites puisque la base de données complète en contient 20 en tout. La moyenne des scores des prédictions est stockée. Ensuite la 6e est ajoutée à la base de données puis les 14 suivantes sont prédites et la moyenne est ajoutée à la liste. L'algorithme continue jusqu'à ce qu'il ne reste plus que deux poudres qui forment la dernière moyenne des scores de prédictions. Les poudres sont traitées dans l'ordre dans lequel elles apparaissent dans la base de données. Les deux dernières poudres sont donc celles qui ont été mesurées le plus récemment. Les listes de ces moyennes (une liste pour chaque type de prédiction) sont utilisées par la suite de l'algorithme pour tracer l'évolution des scores de prédictions en fonction du nombre de

poudres dans la base de données. Sur le graphique de la figure suivante, le calcul des scores est différent de celui du Tableau 17, les pourcentages sont donc sensiblement différents.

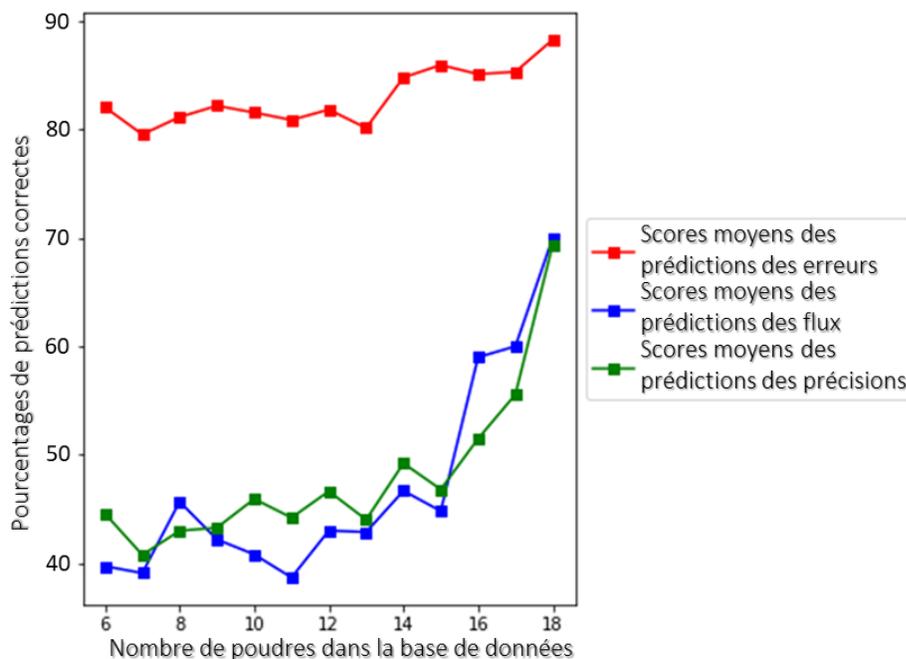


Figure 36 : Graphique de l'évolution des 3 prédictions en fonction du nombre de poudres connues

Sur ce graphique, les trois courbes montrent l'évolution de la prédiction des erreurs, des précisions et des flux d'ensachage en fonction du nombre de poudres dans la base de données. Comme ce sont des moyennes de plusieurs prédictions pour plusieurs poudres les valeurs sont sensiblement différentes du tableau précédent, d'autant plus que la base de données évolue à chaque point de ces courbes. Ainsi, même le dernier point des courbes n'est pas calculé avec la même base de données que le Tableau 17 qui présentait les scores obtenus avec la base de données complète (19 poudres connues pour prédire chaque poudre inconnue). Le dernier point des courbes est le score moyen des prédictions obtenues pour les deux dernières poudres inconnues, avec la base de données qui comporte donc 18 poudres connues.

Les trois courbes augmentent avec l'augmentation du nombre de poudres connues. Ce comportement est très prometteur puisque cela montre que le programme est réellement dans une phase d'apprentissage. Grâce à ce graphique, il est possible d'espérer augmenter encore les scores de prédictions en ajoutant plus de poudres à la base de données.

Ces résultats montrent que le programme doit encore progresser. Cela passe bien entendu par le remplissage progressif de la base de données, mais également par des ajustements des modèles prédictifs. En effet ceux-ci peuvent être améliorés par une étude plus approfondie de leurs comportements.

3.4.3 Impact du nombre de paramètres caractéristiques définissant la poudre

Les deux analyses précédentes à propos des scores de prédictions du programme sont faites en définissant les poudres par leurs 6 propriétés caractéristiques. Comme la base des données est à un état que l'on peut qualifier d'initial par son faible nombre d'entrées, il est intéressant d'observer les performances du programme si un nombre plus petit de propriétés est pris en compte. Or l'analyse des corrélations a montré que toutes les propriétés n'avaient pas le même impact d'un point de vue linéaire sur l'ensachage de la poudre. Celui qui a l'impact le moins important selon cette analyse est l'angle de repos, et après lui c'est le ratio d'expansion. L'apprentissage va donc être réalisé avec les 4 propriétés les plus corrélées puis avec les 5 plus corrélées pour comparer les prédictions à modèle lorsque le modèle utilise les 6 propriétés. De plus, dans la partie 2.3.1, il a été montré que la dimension d'étude peut être réduite tout en conservant les impacts des six propriétés. L'apprentissage va donc être réalisé en définissant les poudres par 4, 5 ou 6 propriétés qui sont les composantes principales de l'analyse PCA, en sachant que les trois premières composantes principales englobaient déjà 94 % de la variance de l'ensemble des poudres de la base de données. Les calculs n'ont pas été faits avec 1, 2 ou 3 prédictions ou facteurs car le programme a pour vocation de représenter le comportement global des poudres et celles-ci doivent donc être définies de la manière la plus complète possible. Pour construire le tableau suivant, les scores actuels

moyens correspondant à la dernière ligne du Tableau 17, créé pour chaque modèle, vont être calculés et reportés dans leurs cases respectives.

Tableau 18 : Récapitulatif des scores de prédiction selon le nombre de paramètres

Nombre de paramètres définissant les poudres	Codes d'erreurs prédits correctement (%)		Flux prédits correctement à 0,5 kg/s près (%)		Précisions prédites correctement à 100 g près (%)	
	Poudre inconnue	Poudre connue	Poudre inconnue	Poudre connue	Poudre inconnue	Poudre connue
4	83,1 %	87,3 %	44,4 %	99,6 %	48,7 %	58,5 %
5	83,3 %	87,5 %	44,0 %	99,6 %	49,0 %	58,0 %
6	83,2 %	85,9 %	45,4 %	99,6 %	50,1 %	59,8 %
6, mais 4 facteurs principaux	83,0 %	86,1 %	44,8 %	99,6 %	48,7 %	58,2 %
6, mais 5 facteurs principaux	83,1 %	86,0 %	44,0 %	99,6 %	48,8 %	58,3 %
6, mais 6 facteurs principaux	83,2 %	86,6 %	44,6 %	99,6 %	48,8 %	58,3 %

Ce tableau permet d'observer que le programme fournit globalement les mêmes scores de prédiction pour les différents cas. Pour la prédiction des erreurs, le programme est sensiblement meilleur avec 5 propriétés des poudres, mais pour les deux autres prédictions il est meilleur en utilisant les 6 propriétés. De plus il est intéressant de remarquer qu'avec le modèle choisi c'est-à-dire le modèle des k plus proches voisins, le programme n'est pas plus performant si l'on utilise les facteurs définis par les composants principaux, indépendants en eux, pour définir les poudres. Ceci peut être dû au comportement très complexe des poudres

dans la machine d'ensachage et au faible nombre de poudres disponibles pour l'apprentissage supervisé (20 poudres). Pour une utilisation immédiate à ce stade du remplissage de la base de données et avec ce modèle, il est donc plus fiable d'utiliser les 6 propriétés puisque les résultats seront meilleurs.

À propos de l'apprentissage, les graphiques de la Figure 37 représentent l'évolution des prédictions pour 4, 5 ou 6 propriétés et pour 4, 5 ou 6 facteurs principaux utilisés pour définir les poudres. Le Tableau 18 présentait les moyennes des scores de prédictions obtenus avec la base de données entière alors que les graphiques suivants montrent leur évolution. Les points du graphique sont donc plus élevés que les valeurs du tableau car les points définissant les courbes sont les moyennes des prédictions des poudres qui n'ont pas encore été ajoutées à la base de données. La Figure 35 rappelle l'algorithme de construction de ces graphiques.

Ces graphiques montrent dans l'ensemble que l'apprentissage est mieux effectué par le programme si les poudres sont définies par leurs propriétés et non par leurs facteurs principaux obtenus par l'analyse des composantes principales. Ce résultat concorde bien avec celui du tableau précédent donnant les moyennes des scores lorsque la base de données contient toutes les poudres. Les différences entre les scores de prédictions sont trop faibles pour conclure de manière claire sur le nombre de propriétés à intégrer au modèle de définition des poudres pour la prédiction de leur ensachage. Néanmoins, il faut retenir qu'il est possible, avec la base de données actuelle, d'obtenir d'aussi bonne prédiction avec un nombre moins grand de paramètres. Pour le moment, il est recommandé de conserver les 6 paramètres jusqu'à ce que cette comparaison soit réitérée avec une base de données plus conséquente. En effet, Les scores semblent sensiblement meilleurs en utilisant seulement 5 propriétés, notamment pour la prédiction du flux. Or, ce résultat ne transparaît pas sur la valeur de la moyenne des scores lorsque toutes les poudres sont utilisées pour la prédiction sauf celle qui est étudiée (cas du Tableau 18 dont la méthode de calcul des scores est différente du graphique de la Figure 37). Il est donc possible que certaines poudres ayant sensiblement le

même comportement pour 5 propriétés aient une différence dans la sixième qui altère la performance du modèle.

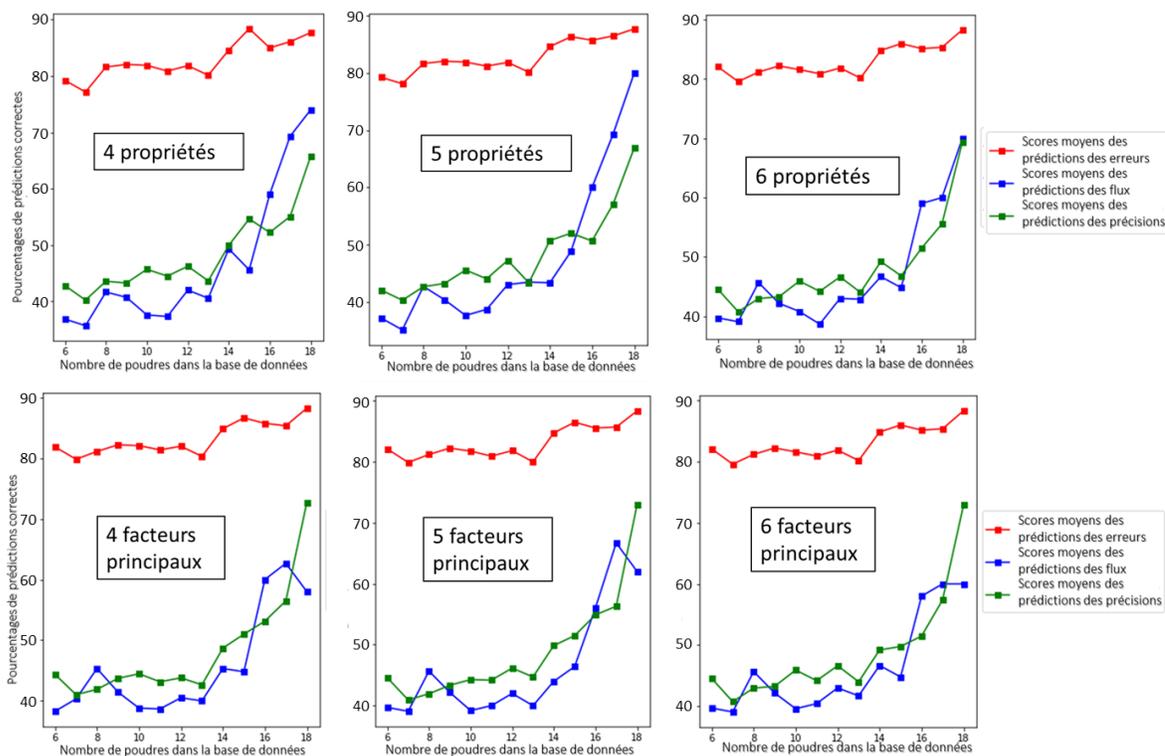


Figure 37 : Comparaison des graphiques de l'évolution du programme selon le nombre de paramètres définissant les poudres

Finalement, l'analyse conjointe du tableau et des graphiques indique que le meilleur nombre de propriétés à utiliser est 6. C'est avec 6 propriétés définissant les poudres que le programme prédit le mieux et apprend correctement le comportement des poudres. Tant que la base de données n'est pas plus conséquente et que cette analyse est effectuée à nouveau, il est plus fiable d'utiliser les 6 propriétés des poudres.

3.4.4 Comparaison avec un modèle linéaire constitué des composantes principales de l'analyse PCA

L'analyse des composantes principales des propriétés caractéristiques des poudres a abouti à la définition de 6 facteurs indépendants, construits comme des combinaisons linéaires des 6 propriétés des poudres. Leur utilisation en tant que variables d'entrée du modèle KPPV n'est pas pertinente comme viennent de le montrer les paragraphes précédents, mais une des suites logiques de l'analyse PCA est la création d'un polynôme utilisant ces facteurs indépendants. Cela permet de diminuer le nombre de paramètres du polynôme tout en gardant toute l'étendue de la variabilité des poudres. Or dans le Tableau 11 qui récapitule les résultats de l'analyse des composantes principales à la section 2.3.1, les composantes principales sont rangées par ordre croissant de la variance des données qu'elles regroupent. Ainsi, les trois premières regroupent 94,3 % de la variance des poudres, les quatre premières 97,8 % et les cinq premières 99,3 %. De plus, comme cela a été vu au début de la partie 3, les modèles polynomiaux ne parviennent pas à apprendre et prédire correctement le comportement des poudres à partir de leurs six propriétés. Cela peut être dû à la trop grande dimensionnalité du problème, et c'est pour cela que le modèle polynomial « RidgeCV » va être utilisé ici pour prédire le flux d'ensachage avec une dimension plus faible. En effet, les variables d'entrées du modèle seront composées de la vitesse de la vis et des 3, 4 ou 5 facteurs principaux indépendants selon le cas étudié. Ce modèle est un modèle polynomial qui combine la régression « Ridge » et l'algorithme de validation croisée présentés en partie 3.1.2. Pour les classifications, c'est le modèle « LogisticRegressionCV » aussi appelé « logit » qui est un modèle de classification polynomial et le seul modèle polynomial parmi les trois modèles de classification étudiés en 3.1.4.

Pour comparer la performance de ces modèles linéaires à la performance du modèle des « k plus proches voisins », les mêmes outils de calcul des scores seront utilisés à savoir le calcul des pourcentages de prédictions correctes et l'évolution de ces pourcentages au fur et à mesure du remplissage de la base de données.

Le Tableau 19 ci-dessous regroupe les performances des modèles linéaires utilisés avec les facteurs indépendants issus de l'analyse des composantes principales. La dernière ligne de ce tableau reprend le Tableau 17 dans lequel les performances du modèle des « k plus proches voisins » sont étudiées. Les différences entre les scores obtenus avec le modèle linéaire sont très faibles. Il semble sensiblement plus performant sur son ensemble d'entraînement pour 5 facteurs d'entrée, mais il est plus performant avec des poudres inconnues avec 3 facteurs d'entrée. Les scores étant très proches, il est difficile de clairement conclure sur le nombre de facteurs indépendants à prendre en compte pour la prédiction par ce modèle.

Tableau 19 : Récapitulatif des scores de prédiction selon le nombre de facteurs principaux pour un modèle linéaire

Nombre de facteurs indépendants	Codes d'erreurs prédits correctement (%)		Flux prédits correctement à 0.5 kg/s près (%)		Précisions prédites correctement à 100 g près (%)	
	Poudre inconnue	Poudre connue	Poudre inconnue	Poudre connue	Poudre inconnue	Poudre connue
5	82,9 %	86,0 %	48,8 %	66,0 %	55,2 %	61,6 %
4	83,0 %	86,3 %	48,0 %	64,8 %	57,0 %	60,6 %
3	82,5 %	87,9 %	49,2 %	65,2 %	56,3 %	61,0 %
Modèle KPPV avec les 6 propriétés	83,2 %	85,9 %	45,4 %	99,6 %	50,1 %	59,8 %

En comparant ces scores avec ceux du modèle KPPV utilisé avec les six propriétés caractéristiques des poudres, on remarque qu'ils sont équivalents, sauf pour la prédiction des flux des poudres connues où le modèle KPPV est bien meilleur. Or il est très important que le modèle soit performant sur son ensemble d'entraînement, même en risquant le surapprentissage, car le programme doit être capable de reconnaître les poudres dont l'ensachage a déjà été mesuré dans cette machine.

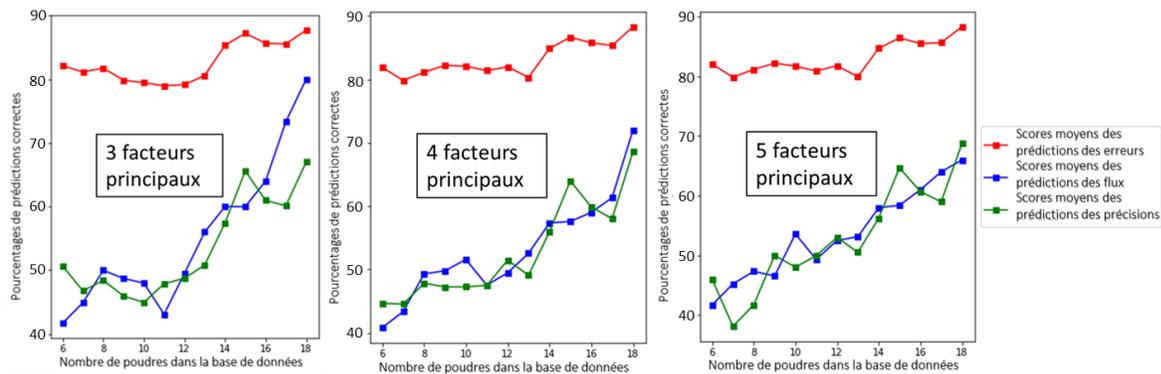


Figure 38 : Comparaison des graphiques de l'évolution du programme selon le nombre de paramètres définissant les poudres

Le graphique de la Figure 38 rejoint l'analyse du Tableau 19 et le modèle linéaire semble effectivement plus efficace pour prédire le flux d'ensachage lorsque seulement les trois facteurs indépendants les plus importants sont utilisés pour définir les poudres. Pour la prédiction des erreurs d'ensachage, la différence n'est pas flagrante sur cette figure, mais en ce qui concerne la prédiction des niveaux de précision, il semble que le modèle soit légèrement plus performant avec cinq facteurs indépendants. Une solution hybride serait d'utiliser les trois premiers facteurs principaux pour prédire les erreurs et le flux d'ensachage et les cinq premiers pour prédire les niveaux de précisions, ce qui permettrait d'avoir un programme le plus performant possible.

Globalement, le modèle linéaire utilisé avec les facteurs indépendants de l'analyse des composantes principales pour définir les poudres peut être considéré comme aussi

performant que le modèle des « k plus proches voisins » utilisé directement avec les six propriétés des poudres. En effet, bien que le modèle linéaire soit quelque peu meilleur pour prédire le comportement dans la machine des poudres inconnues de la base de données, il est bien moins bon pour prédire le comportement de celles qui sont connues. Pour l'entreprise, qui doit se servir du modèle tout en ajoutant peu à peu des poudres dans la base de données, le modèle le plus sûr est le modèle des « k plus proches voisins ». Il sera tout de même judicieux, après avoir étoffé cette base de données avec plus de poudres différentes, de réitérer cette comparaison afin d'utiliser le programme qui s'adapte le mieux à la base de données plus conséquente.

3.5 CONCLUSION

Grâce aux mesures effectuées sur les poudres disponibles et à la création de la base de données pour manipuler toutes ces valeurs, il est possible d'aller plus loin dans l'analyse du comportement des poudres. Le module « scikit-learn » qui fait partie des nombreuses bibliothèques disponibles dans le langage Python permet de prédire le comportement des poudres à l'ensachage à partir de leurs propriétés. Dans cette bibliothèque, beaucoup de fonctions sont disponibles pour construire des modèles d'apprentissage supervisé qui ont la capacité de prédire ensuite un comportement. Après avoir sélectionné et comparé les performances de prédictions des différents modèles parmi les plus utilisés, le modèle des « k plus proches voisins » s'avère être le plus performant pour cette étude. Ce modèle est utilisé en tant que classificateur pour prédire les erreurs et les niveaux de précisions d'ensachage et en tant que modèle de régression pour prédire les valeurs de flux d'ensachage. Les résultats obtenus avec le faible nombre d'entrées dans la base de données, 20 poudres seulement, sont très encourageants pour l'évolution du programme au fil de l'acquisition de nouvelles données. Pour la poudre la plus singulière, le programme n'a qu'un score de 16 %. Toutefois, il est capable de prédire une poudre à 80 % de fiabilité si assez de poudres similaires sont présentes dans la base de données. Le choix du modèle par apprentissage supervisé des plus proches

voisins peut donc être validé pour ce projet, mais nécessite quelques ajustements qui pourront être apportés lorsque le nombre de poudres dans la base de données sera plus important. De plus ce modèle nécessite d'être à nouveau comparé avec le modèle linéaire utilisant les résultats de l'analyse des composantes principales lorsque la base de données contiendra plus de poudres. En effet, cette méthode a montré qu'elle était aussi performante que le modèle KPPV pour la prédiction d'une poudre inconnue, et ce modèle inclut également une régularisation qui permet de réduire le risque de surapprentissage. Cette régularisation ralentit l'apprentissage du modèle et peut être la cause de ses performances moins bonnes que le modèle KPPV. Avec plus de données, la méthode du modèle linéaire pourrait devenir bien meilleure que le modèle KPPV, il suffirait seulement que cette méthode réalise de meilleures prédictions sur son ensemble d'entraînement.

CONCLUSION GÉNÉRALE

RAPPEL DU CONTEXTE

Le projet a pour but de faire le lien entre les caractéristiques des poudres mesurables macroscopiquement et les débits d'ensachage obtenus dans une machine de référence détenue par le partenaire. La problématique de cette étude est la suivante : est-il possible de prédire l'ensachage des poudres à partir de mesures simples et rapides, et comment y parvenir à moindre coût et de manière évolutive ? Cette problématique est soulevée par un problème rencontré par l'entreprise partenaire qui souhaite approfondir sa connaissance des poudres qui sont ensachées par les machines qu'elle conçoit.

RAPPEL DES ACTIONS MENÉES ET DES MÉTHODES APPLIQUÉES

De nombreux appareils de mesures de propriétés des poudres existent déjà chez des distributeurs d'équipements, et le choix pour cette étude s'est porté sur deux appareils permettant de mesurer respectivement l'angle de repos et la densité compactée d'une poudre. Les deux autres appareils nécessaires ont été fabriqués à l'interne et permettent respectivement de mesurer la densité en vrac et l'aération du produit. Ces appareils permettent de calculer six indicateurs du comportement rhéologique des poudres :

- L'angle de repos moyen
- La stabilité de l'angle de repos
- La densité de la poudre

- Le ratio de Hausner
- Le ratio d'expansion
- Le coefficient de perméabilité à un flux d'air

Ces six propriétés sont utilisées pour définir une poudre de manière rapide, simple et sont basées pour la plupart sur des normes internationales. Une analyse des corrélations entre les propriétés est menée pour observer leurs dépendances et leurs impacts sur le flux de poudre lors de l'ensachage. Les poudres qui sont le sujet de cette étude sont ensachées par une machine industrielle conçue et fabriquée par l'entreprise, Premier Tech Chronos. Grâce à l'expertise de ses équipiers, un protocole de mesures a été mis en place pour mesurer les performances d'ensachage de la machine, qui doit déposer la poudre au fond du sac avec un flux conséquent, une précision fine, et en évitant les erreurs de blocage du produit dans le système. Pour cela, la machine est définie comme une machine de référence sur laquelle seules l'ouverture de remplissage et la vitesse de la vis amenant le produit peuvent varier. Au total, 25 configurations ouvertures/vitesses sont testées et permettent la caractérisation d'une poudre dans la machine en relevant le flux, la précision et les erreurs d'ensachage lorsqu'elles se produisent. Ces données sont entrées dans une base de données qui permet de les manipuler facilement.

Pour observer le domaine des poudres testées, une analyse des composantes principales (PCA) a montré que deux et trois composantes principales permettent respectivement d'englober 80 % et 95 % de la variabilité des vingt poudres mesurées. Ainsi, il est possible d'observer et de comparer les poudres connues de manière qualitative uniquement grâce à des mesures rhéologiques rapides. L'expertise de l'entreprise montre qu'en comparant les poudres entre elles via leurs aspects comportementaux, il est possible de relier leurs capacités à être ensachées facilement ou non. C'est pourquoi, pour poursuivre la connaissance de ces produits, une comparaison plus profonde est effectuée grâce à des calculs de distances entre les propriétés. Pour une poudre inconnue dont la rhéologie a été mesurée, un calcul de distances est utilisé pour trouver la poudre connue la plus semblable pour chaque propriété.

Comme ces poudres similaires sont connues et leur comportement a été mesuré dans la machine, et comme le pourcentage de similitude est aussi calculé, il est possible d'analyser et d'apprécier les performances atteignables avec cette poudre inconnue.

L'analyse des poudres qui a été faite a permis de mettre en service un programme codé sous Python qui, grâce à un modèle de prédiction, apprend le comportement des poudres lors de l'ensachage pour prédire leurs performances. Les prédictions, qui sont faites sur des poudres inconnues et également sur des poudres faisant partie de l'ensemble d'entraînement du modèle de prédiction, sont confrontées à la réalité. Que ce soit pour la classification des niveaux de précisions, des erreurs d'ensachage, ou bien pour la régression des flux, le modèle le plus adapté aux données étudiées est le modèle des K plus proches voisins (KPPV). Un modèle linéaire est également mis en place, avec la particularité d'utiliser les facteurs principaux issus de l'analyse PCA sur les propriétés des poudres. Les trois facteurs les plus importants sont utilisés et les prédictions sont alors comparées à celles du modèle KPPV. Or le programme a été créé pour prédire le comportement des poudres inconnues, alors ce sont les poudres similaires, dont la performance à l'ensachage a été mesurée, qui sont directement comparées graphiquement aux valeurs prédites. Cela permet, dans un contexte industriel, de bénéficier d'une comparaison visuelle rapide pour estimer la pertinence des prédictions. Pour les besoins de cette première mise en place du programme, une étude de ses erreurs et de son évolution est également mise en place en comparant les prédictions avec les mesures réelles pour des poudres qui n'ont pas fait partie de l'ensemble des poudres d'entraînement du modèle. C'est cette étude des scores des modèles qui permet de les comparer objectivement.

RÉSULTATS OBTENUS

Premièrement, les propriétés choisies l'ont été en prenant en compte les sollicitations mécaniques que le produit subit lors de son ensachage par la machine. L'analyse des corrélations a montré que les propriétés pouvaient être considérées comme indépendantes dans un premier temps puisque leurs coefficients de corrélation linéaires entre elles sont

faibles. De plus, aucune des six propriétés ne peut être écartée de l'étude, et les six seront donc utilisées pour définir les poudres. Pour décrire l'ensachage d'une poudre, que ce soit son flux ou sa précision, les coefficients de corrélation linéaires n'ont pas montré de liens forts les six propriétés des poudres, mais aucune n'est insignifiante linéairement. L'étude menée permet donc de valider l'utilisation des appareils de mesure achetés ou fabriqués pour ce projet. De plus, cette analyse permet de confirmer que ces six propriétés vont être utiles à la définition du comportement des poudres et à la prédiction de ce comportement dans l'ensacheuse industrielle. Cette analyse amène vers la création d'une fonction polynomiale reliant le comportement macroscopique des poudres et leur ensachage. Mais les modèles polynomiaux de degré 1 et 2 testés n'ont pas montré les résultats attendus, ce qui explique l'utilisation d'un modèle plus performant : celui des « k plus proches voisins ». Le modèle linéaire n'est pas rejeté pour autant puisqu'en réduisant la dimension de l'ensemble des poudres étudiées, de très bons résultats de prédiction sont obtenus. Les six propriétés des poudres sont utilisées pour une analyse des composantes principales qui permet de former six facteurs indépendants à partir de combinaisons linéaires des six propriétés. Chaque facteur ainsi formé permet de représenter un certain pourcentage de la variance totale des poudres de la base de données et les trois plus importants en expriment au total 95 %. Grâce à ces trois facteurs pour définir les poudres, le modèle polynomial du premier degré permet de prédire le comportement d'une poudre inconnue avec un score de plus de 82 % pour les erreurs d'ensachage, à presque 50 % pour le flux à 0,5 kg/s près et plus de 56 % pour les niveaux de précisions, à 100 grammes près. Néanmoins, et même si ces scores de prédictions sont légèrement supérieurs à ceux du modèle finalement choisi, ce modèle linéaire n'est pas assez performant pour la prédiction du comportement des poudres connues, notamment pour la prédiction de leur flux d'ensachage.

Grâce au modèle d'apprentissage supervisé par les k plus proches voisins, utilisé plusieurs fois dans le programme, il est possible de prédire le comportement de certaines poudres à plus de 70 % de justesse pour l'ensemble de leur ensachage. En l'état actuel du programme et pour une poudre inconnue, le programme prédit correctement en moyenne 45 % des flux à 0,5 kg/s près, 83 % des erreurs d'ensachage et 50 % des précisions à

100 grammes près. Si la poudre est connue en revanche, le programme prédit de manière correcte 99 % des flux, 86 % des erreurs et 60 % des précisions. Pour les classements des erreurs et des précisions, le programme fait des prédictions qui semblent satisfaisantes pour une première étude sur le sujet et pour le nombre de poudres disponibles restreint (seulement 20). Le modèle de prédiction des flux éprouve quelques difficultés puisque certaines poudres sont mal prédites.

Un autre outil permet, grâce aux écarts calculés pour chaque propriété entre une poudre étudiée et les poudres connues dans la base de données, de trouver les 7 poudres les plus semblables à celle étudiée. Une poudre similaire est trouvée pour chaque paramètre et la septième est la plus semblable en moyenne. Cela permet de savoir quantitativement les proximités existantes entre les poudres et également de pouvoir anticiper certaines erreurs d'ensachage ou certains intervalles de flux ou de précisions auxquels il faut s'attendre pour la poudre comparée. Cet outil permet également d'utiliser les mesures d'ensachage des poudres similaires pour confronter les prédictions sur la poudre inconnue à la réalité. De cette manière, l'analyse des prédictions des flux et des précisions pour les différentes configurations d'ensachage devient très visuelle par le tracé, sur les mêmes graphiques, des prédictions et des valeurs mesurées des 7 poudres similaires.

Deux autres outils ont également été développés lors de cette étude pour compléter l'analyse des poudres de la base de données. Pour observer l'ensemble des poudres connues, chaque poudre est tracée selon deux axes qui sont les deux premiers facteurs indépendants issus de l'analyse des composantes principales. Ces deux facteurs expriment environ 80 % de la variance totale des poudres connues et permettent donc de représenter visuellement les proximités entre les poudres et de voir lesquelles sont complètement différentes de la majorité des autres. Cet outil a montré son utilité pour une première analyse rapide et visuelle d'une poudre inconnue. Le dernier outil utilise les prédictions du modèle numérique qui a été mis en place pour simuler une recette d'ensachage via un fichier de tableur. En choisissant le temps accordé à chaque phase de remplissage, l'ouverture et la vitesse de vis souhaitées, le fichier calcule la quantité de poudre ensachée et l'intervalle du poids total du sac en fonction

de la précision d'ensachage prédite par le modèle. Il donne également la durée minimale et maximale du remplissage de précision de la dernière phase en fonction du remplissage des phases précédentes afin de permettre à l'utilisateur de maîtriser toutes les étapes de l'ensachage. Cet outil permet de gagner de précieuses heures d'essais dans la machine et l'utilisateur a seulement besoin de valider ses résultats en testant avec la machine les meilleures configurations pour vérifier les prédictions de l'outil.

La base de données doit encore être enrichie de manière conséquente pour observer l'évolution à grande échelle de ces modèles, mais il serait judicieux d'étudier en détail les prédictions du modèle de régression des flux, car malgré les précautions prises pour éviter le surapprentissage, les scores du programme semblent montrer que ce phénomène se produit. Pourtant, l'étude de l'évolution du programme en fonction du remplissage de la base de données est très encourageante. En effet, le graphique fourni par cette étude a montré que le programme apprenait réellement le comportement des poudres qui est étudié. L'explication réside pour l'instant dans un manque de données et il s'agira pour les études prochaines sur l'ensachage des poudres de valider, avec beaucoup plus de poudres connues, le choix du modèle. En effet le modèle linéaire utilisant des facteurs indépendants pour définir les poudres montre lui aussi une courbe d'apprentissage très encourageante et pourrait, à terme, devenir meilleur que le modèle des « k plus proches voisins » grâce à la régularisation qui réduit le risque de surapprentissage.

RÉPONSE GLOBALE À LA PROBLÉMATIQUE

Cette étude a permis de montrer que les poudres peuvent être caractérisées efficacement par quelques propriétés mesurables de façon macroscopique. Ces mesures sont rapides puisque la caractérisation complète ne prend qu'une heure, et elles demandent peu de produit puisque l'échantillon nécessaire est d'un litre. Les propriétés mesurées permettent de comparer les poudres entre elles en observant leur domaine et en déterminant des pourcentages de similarité entre elles. Grâce à la construction d'une base de données facile

d'accès sous forme de tableaux et à un outil d'analyses prenant la forme d'une interface utilisateur simple, tous les outils de comparaison et de prédiction sont accessibles. Des modèles de prédiction des flux et des précisions d'ensachage ont été mis en place pour lier les propriétés des poudres et leur ensachage. Ces modèles fonctionnent très bien pour la plupart des poudres bien qu'ils soient encore limités par le nombre trop faible de données disponibles. Enfin, toutes les prédictions calculées par le programme sont comparables, via un graphique, à la réalité grâce aux poudres similaires connues. Cela permet à l'entreprise d'apporter un regard critique sur la performance directe des modèles de prédictions, même pour des poudres inconnues. Toute la conception des outils permet le remplissage de la base de données en tout temps et l'évolution des modèles en fonction du nombre de poudres qui en font partie. L'application, qui rassemble tous les outils développés et qui est validée lors de cette étude, permet donc de prédire les capacités d'ensachage d'une poudre dans la machine étudiée à partir uniquement de ses propriétés rhéologiques qui se mesurent rapidement et simplement, tout en étant capable d'évoluer au fil des mesures futures.

RECOMMANDATIONS

Dans l'ensemble, cette étude a satisfait les objectifs principaux dans le temps imparti. Néanmoins quelques points peuvent être améliorés, repris ou étudiés selon d'autres hypothèses.

Tout d'abord il serait judicieux d'augmenter le nombre de poudres dans la base de données. Une cinquantaine de poudres devrait permettre d'identifier clairement la performance du programme. Ensuite, une centaine de poudres ou plus permettrait d'utiliser le programme avec une fiabilité acceptable.

Une étude plus approfondie des modèles de prédiction pourrait être effectuée, avec une base de données plus importante, et permettrait de valider le choix qui a été fait dans cette étude ou éventuellement le modifier par le choix d'un meilleur modèle ou une meilleure

adaptation des hyperparamètres. De plus, avec des données plus importantes il serait judicieux de ne plus réitérer l'apprentissage au complet à chaque prédiction, mais plutôt à chaque nouvel ajout, et de stocker les valeurs des poids attribués à chaque paramètre pour utiliser le modèle appris pour la prédiction.

À propos des paramètres utilisés, il serait intéressant, avec plus de données, de poursuivre avec l'analyse des composantes principales utilisées dans le modèle de prédiction polynomial. Cette méthode devra rester évolutive pour que le programme reste un outil qui s'adapte de mieux en mieux aux données disponibles. Avec 20 poudres, cette méthode n'est pas aussi performante que le modèle des « k plus proches voisins », mais il s'agit de vérifier cela avec beaucoup plus de poudres à analyser. De plus, et selon les performances de ces deux modèles avec un nombre plus conséquent de poudres, un programme hybride pourrait apporter une solution complète. Par exemple, le modèle KPPV pourrait être utilisé lorsque le programme détecte que la poudre inconnue est très proche d'une poudre de la base de données, car ce modèle est très performant sur son ensemble d'entraînement. Le programme pourrait alors utiliser le modèle linéaire avec les trois facteurs principaux lorsque la poudre étudiée n'est pas très proche d'une autre, car ce modèle semble plus efficace pour la prédiction sur son ensemble de tests. Ce type de programme pourrait faire l'objet d'une nouvelle étude dans la continuité de celle qui a été présentée dans cette rédaction.

Enfin, toute l'étude qui a été présentée ici repose sur les données qui ont été prises et surtout sur les propriétés qui ont été choisies. Les propriétés définissant le comportement rhéologique pourraient être complétées par l'achat d'un rhéomètre à hélice qui fournit directement un indice de fluidité et permettrait peut-être de compléter la caractérisation des poudres. Cet appareil avait été écarté de l'étude à cause de son prix, mais avec l'évolution prometteuse du projet il serait intéressant d'observer son impact. L'aération des poudres et plus particulièrement leur tendance à former de la poussière lors de l'ensachage n'a pas pu être étudiée en tant que telle à cause d'un manque de produits très poussiéreux. Après une observation préliminaire de leur propension à faire de la poussière, il serait intéressant de définir un protocole de mesure de ce phénomène dans la machine pour effectuer un lien entre

les mesures d'aération faites sur l'appareil fabriqué en interne. Le but ultime serait d'avoir une fonction de prédiction ou des intervalles des propriétés d'aération qui permettraient de prévoir cet empoussièrement pour prévoir l'installation de dispositifs anti-empoussièrement directement sur la machine.

Pour terminer, il a été vu que les précisions d'ensachage doivent être définies par niveaux pour être prédites correctement à un pourcentage acceptable. La difficulté à prédire cet indicateur est possiblement liée à la mesure qui en est faite. En effet dans cette étude le remplissage se fait par rapport à un temps de référence, ce qui est une bonne référence pour le flux. Pour la précision en revanche, c'est plutôt le système de pesée de la machine qui est prédominant. Il serait donc judicieux de reprendre le protocole en demandant à la machine de déposer par exemple 2 kilogrammes dans le sac plusieurs fois pour différentes configurations d'ouverture et de vitesses puis peser le résultat. L'étude de la moyenne et de l'écart-type des résultats donnerait normalement une meilleure indication des précisions. Cette approche serait plus en adéquation avec ce qui est effectivement effectué lors de l'ensachage industriel des poudres. La répartition des poudres par niveaux de précision pourrait être gardée, mais avec plus de données, il serait possible d'utiliser beaucoup plus de niveaux et donc de fournir une meilleure prédiction, plus fiable et plus précise.

ANNEXES

ANNEXE I : PROTOCOLES DE MESURES DES PROPRIÉTÉS CARACTÉRISTIQUES

Cette annexe regroupe les 4 protocoles de mesures sur les appareils de caractérisation du comportement rhéologique des poudres. Les mesures principales sont les suivantes :

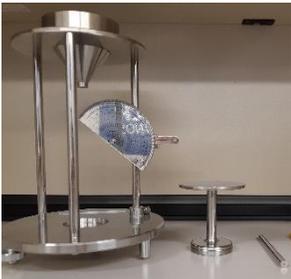
- Appareil de mesure de l'angle de repos
- Appareil de mesure de la densité tassée
- Appareil de mesure de la densité en vrac
- Appareil de mesure de l'aération



PROCOLE DE MESURE

Angle de repos d'une poudre

1. Matériel

- Pelle en acier inoxydable pour prélever de la poudre. 
- Récipient hermétique (pot Masson). 
- Une quantité de poudre à tester suffisante : entre 800 mL et 1,2 L.
- 1 appareil de mesure de caractéristiques physiques, ici le montage pour l'angle de repos composé de :
 - Base en Acier inoxydable
 - Entonnoir
 - Support circulaire sous l'entonnoir
 - Rapporteur d'angle
 - Stylet en acier inox et pinceau en bois
- Brosse sèche et papier industriel de nettoyage.
- S'assurer d'avoir lu la fiche signalétique de la poudre à mesurer et prendre toutes les précautions pour la manipuler.

2. Préparation du plan de travail

- Disposer l'appareil sur un plan de travail spacieux et facilement nettoyable.
- S'assurer que le dispositif est stable et que toutes les pièces sont bien présentes (voir Matériel).
- S'assurer que le dispositif soit à niveau (la bulle doit être au centre du rond du niveau à bulle présent sur le socle). Si ce n'est pas le cas, ajuster le niveau du socle avec les pieds réglables.
- S'assurer que le dispositif ne soit pas soumis à des vibrations ou des chocs. Par exemple qu'il ne soit pas sur la même table que l'appareil de mesure de la densité tassée qui provoque des vibrations.
- Placer le stylet en acier inoxydable au centre de l'entonnoir pour boucher le trou.
- S'assurer que l'entonnoir ainsi que le support du tas sont propres et secs. S'assurer que le rapporteur soit bien éloigné de l'écoulement de la poudre pour ne pas gêner.

3. Prélèvement d'un échantillon homogène : Préparation du produit à tester

- Prélever 500 mL de poudre dans le pot Mason à partir de l'échantillon. Tous les prélèvements doivent être réalisés, sans détériorer la poudre.
- Conditionner l'échantillon : Tourner et secouer légèrement le récipient sur tous les axes pour préparer le produit à être mesuré et annuler toutes ses sollicitations antérieures.
- Verser la poudre dans l'entonnoir du montage. Remplir l'entonnoir aux $\frac{3}{4}$.

Cela permet d'avoir un échantillon de poudre homogène, peu importe les strates dans le sac ou le temps passé en stockage.

4. Réalisation des mesures

- Retirer le stylet de l'entonnoir pour permettre à la poudre de s'écouler. Si le produit ne s'écoule pas, remettre le stylet et le faire tourner en l'inclinant pour amener la poudre à tomber. Cela peut être long pour les poudres les plus fines et les plus collantes, avec lesquelles il s'agira presque de pousser la poudre vers le bas pour la faire couler.
Il n'est pas obligatoire de faire s'écouler toute la poudre présente dans l'entonnoir si le tas formé est assez important pour être mesuré.
- Approcher le rapporteur du tas sans jamais le faire toucher au produit pour éviter de détériorer le tas, ce qui fausserait complètement la mesure.

- Approcher délicatement le rapporteur du socle et ajuster son angle pour qu'il soit le même que celui du tas, sans toucher la poudre (photos ci-dessous). Le parallélisme entre le rapporteur et la pente du tas peut être fait en mettant le rapporteur en contact avec le socle en inox pour être plus proche du tas et avoir un angle le plus



précis possible.

- Lire l'angle pointé par la flèche rouge sur le support du rapporteur et reporter cet angle dans le tableau.
- Tourner délicatement le plateau support du tas pour mesurer l'angle en 3 endroits du tas (environ espacés de 120 °). L'angle mesuré en réalité vaut $180 - \text{AOR}$, mais le calcul sera effectué automatiquement dans la base de données.
- Si un choc ou autre fait bouger le tas, recommencer la mesure depuis le début, car son angle aura diminué.
- Écrire les mesures dans le tableau correspondant sur la feuille de la poudre testée. Cette feuille peut être au format papier ou directement dans la base de données.

5. Répétition des mesures

Effectuer la mesure 3 fois sur la même poudre pour en dégager la moyenne, en reprenant le protocole des sections 3 et 4 comme ceci :

- S'il reste assez de poudre dans le pot Mason pour remplir l'entonnoir, utiliser cette poudre. Sinon remplir à nouveau le pot Mason avec la poudre encore disponible dans l'échantillon.
- Chaque échantillon mesuré doit être remis dans le bocal d'échantillon après la mesure et après avoir rerepli le pot Mason pour éviter de remesurer deux fois exactement le même échantillon.
- Conditionner l'échantillon comme précédemment pour annuler ses sollicitations antérieures.
- Procéder à la mesure comme décrite en section 4.

L'angle réel de repos de la poudre sera déterminé par la moyenne finale de ces 9 mesures d'angles.

6. Nettoyage et rangement de l'appareil

- Retirer la poudre du plateau et la remettre dans son bocal. Retirer également la poudre de l'entonnoir s'il en reste.
- Nettoyer les ustensiles, récipients et le poste de travail autour. Retirer toute trace de poudre. (Pinceau et papier industriel sec).
- Nettoyer à l'eau (et au savon si nécessaire) les éléments de l'appareil. Bien les sécher ensuite avant toute utilisation.
- Remettre tous les éléments à leur place pour une autre utilisation.
- Ranger la poudre dans son bocal d'échantillon en prenant soin de ne pas la contaminer.
- Ranger le bocal dans l'armoire de stockage des échantillons.



PROTOCOLE DE MESURE

Densité tassée d'une poudre

1. Matériel

- Pelle en acier inoxydable pour prélever de la poudre. 
- Récipient hermétique (pot Masson). 
- Une quantité de poudre à tester suffisante : Au moins 500 mL.
- 1 appareil de mesure de caractéristiques physiques, ici le Tap Density Tester composé de :
 - Socle avec écran de contrôle et système de tapes
 - Cylindre gradué en verre
 - Entonnoir en plastique pour remplir le cylindre
 - Balance précise à $\pm 0,1$ g
 - Élément d'amortissement des chocs
- Brosse sèche et papier industriel de nettoyage.
- S'assurer d'avoir lu la fiche signalétique de la poudre à mesurer et prendre toutes les précautions pour la manipuler.

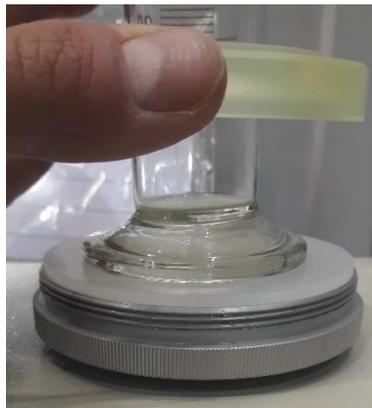
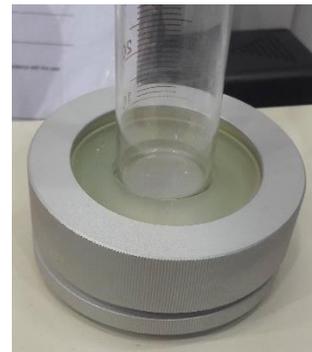
2. Préparation du plan de travail

- Disposer l'appareil sur un plan de travail spacieux.
- S'assurer que le dispositif est stable et que toutes les pièces sont bien présentes (voir Matériel).
- Brancher l'appareil au réseau électrique.
- Peser la masse du cylindre gradué vide et mettre la balance à 0.

3. Prélèvement d'un échantillon homogène : Préparation du produit à tester

- Prélever 500 mL de poudre dans le pot Mason à partir de l'échantillon. Tous les prélèvements doivent être réalisés avec délicatesse, sans détériorer la poudre.

- Conditionner l'échantillon : Tourner et secouer légèrement le récipient sur tous ses axes pour préparer le produit à être mesuré. Le produit doit gagner en fluidité et doit perdre ses sollicitations antérieures.
- Verser la poudre dans le cylindre gradué jusqu'à atteindre un volume entre 50 et 60 mL. S'aider d'un entonnoir en plastique pour effectuer un remplissage propre et plus simple (photo ci-contre).
- Noter la masse exacte M de poudre présente dans l'éprouvette (en grammes).
- Placer l'éprouvette délicatement sur le disque d'amortissement, lui-même posé sur le plateau mobile du dispositif. (Voir photo ci-contre)
- Faire passer le disque de maintien en plastique et la molette de serrage autour de l'éprouvette et serrer le tout à la main (photo ci-dessous). Ici l'éprouvette est vide, mais en réalité elle sera remplie.



Cela permet d'avoir un échantillon de poudre homogène, peu importe les strates dans le sac.

4. Réalisation des mesures

- Entrer le nombre de tapes : Bouton « TAP NUM ». Régler à 625 tapes.
- Régler la vitesse sur 200 via le bouton rotatif sous le clavier. Appuyer ensuite sur « START »

- Une fois le compactage terminé, lire le volume V_{625} . Si la surface n'est pas plane, faire une moyenne entre la graduation minimale et maximale de la surface de la poudre. Lire le volume à 0,5 mL près.
- Écrire les mesures (masse et volume) dans le tableau correspondant sur la feuille de la poudre testée. Cette feuille peut être au format papier ou directement dans la base de données.
- Le calcul de la densité n'est pas nécessaire, car il sera fait automatiquement par la base de données, mais l'appareil est capable de le calculer de la manière suivante (il faut avoir entré la masse en grammes via le bouton « WT ») : Entrer le volume dans le système : « VOL » puis taper le chiffre en mL et appuyer sur « CAL ». Le résultat qui s'affiche est la densité tassée de la poudre, exprimée en g/mL.
- La masse sera toujours exprimée en Grammes et le volume en mL pour que le calcul de la densité se fasse en g/mL dans la base de données.

5. Répétition des mesures

Effectuer la mesure 2 fois sur la même poudre pour en dégager la moyenne, en reprenant le protocole des sections 3 et 4 comme ceci :

- Remplir à nouveau le pot Mason avec la poudre encore disponible dans l'échantillon.
- Chaque échantillon mesuré doit être remis dans le bocal d'échantillon après la mesure pour éviter de remesurer deux fois exactement le même échantillon.
- Conditionner l'échantillon comme précédemment pour annuler ses sollicitations antérieures.
- Procéder à la mesure comme décrite en section 4.

6. Nettoyage et rangement de l'appareil

- Vider le cylindre gradué en prenant soin de ne pas contaminer la poudre pour la remettre dans son bocal d'échantillon.
- Nettoyer les ustensiles, récipients et le poste de travail autour. Retirer toute trace de poudre. (Pinceau et papier industriel sec). Utiliser la brosse à cylindre si les traces persistent.
- Nettoyer à l'eau (et au savon si nécessaire) les éléments de l'appareil. Bien les sécher ensuite avant toute autre utilisation.
- Éteindre l'appareil et le débrancher du secteur.
- Remettre tous les éléments à leur place pour une autre utilisation.

- Ranger la poudre dans son bocal d'échantillon en prenant soin de ne pas la contaminer
- Ranger le bocal dans l'armoire de stockage des échantillons.



PROTOCOLE DE MESURE



Densité apparente d'une poudre (densité en vrac)



7. Matériel

- Pelle en acier inoxydable pour prélever de la poudre. 
- Récipient hermétique (pot Masson).
- Une quantité de poudre à tester suffisante : entre 800 mL et 1,2 L.
- 1 appareil de mesure de caractéristiques physiques ici le Scott Volumeter composé de :
 - o Entonnoir en aluminium
 - o Récipient sous l'entonnoir
 - o Plaque de métal pour égaliser le rebord du récipient
 - o Balance précise à $\pm 0,1$ g
- Brosse sèche et papier industriel de nettoyage.
- S'assurer d'avoir lu la fiche signalétique de la poudre à mesurer et prendre toutes les précautions pour la manipuler.

8. Préparation du plan de travail

- Disposer l'appareil sur un plan de travail spacieux.
- S'assurer que le dispositif est stable et que toutes les pièces sont bien présentes (voir Matériel).
- S'assurer que l'ouverture de l'entonnoir est bouchée, et que l'entonnoir ainsi que le récipient à poudre sont propres et secs.

9. Prélèvement d'un échantillon homogène : Préparation du produit à tester

- Prélever 800 mL de produit dans le pot Mason à partir de l'échantillon (jusqu'au niveau du commencement du goulot, le pot est rempli à 90 %). Tous les prélèvements doivent être réalisés sans détériorer la poudre.

- Conditionner l'échantillon : Tourner et secouer légèrement le récipient sur tous les axes pour préparer le produit à être mesuré. Le produit doit gagner en fluidité et doit perdre ses sollicitations antérieures.
- Verser la poudre fluidisée dans l'entonnoir de l'appareil. Taper le fond du pot Mason si nécessaire, mais éviter de le taper sur l'entonnoir.
- Rajouter une peu de poudre si nécessaire : l'entonnoir doit être rempli jusqu'en haut.

Cela permet d'avoir un échantillon de poudre homogène, peu importe les strates dans le sac ou le temps passé en stockage.

10.Réalisation des mesures

- Peser la masse du récipient normalisé vide et mettre la balance à 0. Remettre le récipient sous l'entonnoir.
- Retirer le bouchon de l'entonnoir (faire pivoter la plaque qui empêche l'écoulement) pour permettre à la poudre de s'écouler dans le récipient normalisé. Si le produit ne s'écoule pas (ou pas entièrement), insérer doucement la plaque de métal dans la poudre pour créer une ouverture de coulée. Eviter de faire vibrer la poudre, car cela pourrait seulement la tasser.
- Si toute la poudre s'est écoulee, mais que le récipient de réception n'est pas rempli plus haut que son bord, il faut recommencer la mesure depuis le début, car rajouter de la poudre fausse la mesure ; en effet la sollicitation n'est plus la même.
- Lorsque l'écoulement est terminé, retirer la poudre en surplus au-dessus du récipient grâce à la plaque de métal en contact avec la surface du récipient et en prenant soin de garder la lame perpendiculaire pour éviter de compacter la poudre ou de trop en retirer.
- Peser le récipient plein exactement à raz-bord sur la balance (préalablement mise à 0 avec le récipient vide à $\pm 0,1$ g en début de section 4).
- Écrire les mesures dans le tableau correspondant sur la feuille de la poudre testée. Cette feuille peut être au format papier ou directement dans la base de données.
- La masse sera toujours exprimée en Grammes pour que la masse volumique apparente en vrac de la poudre soit exprimée par la formule : $\rho_{\text{vrac}} = m/V$ (en g/mL) où V, le volume du récipient, est connu : $V = 501$ mL. Exprimer le résultat arrondi à 3 décimales (calculée automatiquement par la base de données).

11.Répétition des mesures

Effectuer la mesure 3 fois sur la même poudre pour en dégager la moyenne, en reprenant le protocole des sections 3 et 4 comme ceci :

- Remplir à nouveau le pot Mason avec la poudre encore disponible dans l'échantillon.
- Chaque échantillon mesuré doit être remis dans le bocal d'échantillon après la mesure pour éviter de remesurer deux fois exactement le même échantillon.
- Si le pot Mason n'est pas assez rempli pour cette expérience, terminer son remplissage avec la poudre du sac, même si une partie a déjà servi pour la mesure précédente.
- Conditionner l'échantillon dans le pot Mason comme précédemment pour annuler ses sollicitations antérieures.
- Procéder à la mesure comme décrite en section 4.

12.Nettoyage et rangement de l'appareil

- Vider le récipient en prenant soin de ne pas contaminer la poudre pour la remettre dans son bocal d'échantillon. Retirer la poudre en surplus tombée autour du récipient avec un pinceau et la faire tomber dans le sac.
- Nettoyer les ustensiles, récipients et le poste de travail autour. Retirer toute trace de poudre. (Pinceau et papier industriel sec).
- Nettoyer à l'eau (et au savon si nécessaire) les éléments de l'appareil. Bien les sécher ensuite avant toute autre utilisation.
- Remettre tous les éléments à leur place pour une autre utilisation.
- Ranger la poudre dans son bocal d'échantillon en prenant soin de ne pas la contaminer.
- Ranger le bocal dans l'armoire de stockage des échantillons.



PROTOCOLE DE MESURE

Aération d'une poudre dans un cylindre

1. Matériel

- Pelle en acier inoxydable pour prélever de la poudre.
- Récipient hermétique (pot Masson).
- Une quantité de poudre à tester suffisante : entre 800 mL et 1,2 L.
- 1 appareil de mesure de caractéristiques physiques, ici le montage pour l'aération d'un lit de poudre composé de :
 - Base en Acier inoxydable avec éléments pneumatiques
 - Socle du cylindre et grille circulaire
 - Cylindre gradué en plexiglas
 - Tuyau pneumatique
 - Filtre en papier
 - Alimentation électrique des capteurs
- Brosse sèche et papier industriel de nettoyage.
- S'assurer d'avoir lu la fiche signalétique de la poudre à mesurer et prendre toutes les précautions pour la manipuler.



2. Préparation du plan de travail

- Disposer l'appareil sur un plan de travail spacieux et facilement nettoyable.
- S'assurer que le dispositif est stable et que toutes les pièces sont bien présentes (voir Matériel).
- S'assurer que le cylindre ainsi que son support sont propres et secs.
- Fermer la vanne d'arrivée d'air du laboratoire si ce n'est pas déjà fait. Raccorder le tuyau pneumatique entre le réseau de la salle et le montage. Rouvrir la vanne.
- S'assurer que la grille est correctement en place dans le socle. Retirer le cylindre de son socle et placer le filtre papier sur cette grille et dans la rainure du socle prévue à cet effet. Remettre le cylindre sur son socle.
- Brancher le câble d'alimentation des capteurs.
- Calibrer le flux d'air :
 - Régler le régulateur de pression à 0,05 MPa (manomètre directement monté sur le régulateur)

- Ouvrir la vanne d'air du dispositif. L'air passe dans tout le circuit et dans le cylindre avec le filtre papier, mais aucune poudre.
- Observer la pression en kPa affichée sur le capteur à affichage numérique : la pression doit être de 1 kPa. Adapter le flux si nécessaire grâce à la molette du régulateur de flux sous le régulateur de pression.
- Vérifier qu'en diminuant la pression sur le régulateur de pression, la valeur atteint 0,4 kPa. Sinon augmenter légèrement le flux et vérifier que la pression à 0,05 MPa vaut 1 kPa.
- Fermer la vanne d'air du dispositif.

3. Prélèvement d'un échantillon homogène : Préparation du produit à tester

- Préparer rapidement l'échantillon à tester directement dans le bocal de rangement étiqueté : le tourner et le secouer délicatement sur tous les axes.
- Verser la poudre dans le cylindre jusqu'à 3'' de hauteur. Ce versement lent va contribuer à aérer la poudre en plus de la sollicitation précédente.
- Tapoter le cylindre pour avoir une surface de poudre plane.
- Afin d'éviter trop de dégagements de poussière sans influencer sur la pression dans le tube : ajouter une plaque pour le fermer, munie d'un échappement.

Cela permet d'avoir un échantillon de poudre homogène, peu importe les strates dans le sac ou le temps passé en stockage.

4. Réalisation des mesures

- Noter la hauteur initiale exacte du produit dans le cylindre (en pouces).
- Débrancher le tuyau au niveau du socle du cylindre. Ouvrir la vanne. Régler la pression sur le régulateur pour que le capteur à affichage numérique affiche 0,4 kPa.
- Rebrancher le tuyau d'air et ouvrir la vanne.
- Noter la hauteur à laquelle le produit monte. Noter la pression à laquelle le capteur se stabilise (en kPa).
- Fermer la vanne.
- Tapoter à nouveau le cylindre pour faire redescendre la poudre à sa position initiale.
- Répéter la mesure : avec les réglages suivants 0,6 kPa ; 0,8 kPa, 1 kPa
 - Débrancher le tuyau,
 - Ouvrir la vanne,

- Régler à 0,6 kPa,
 - Fermer la vanne,
 - Rebrancher.
 - Rouvrir la vanne et noter les mesures faites.
 - Fermer la vanne
- Écrire les mesures dans le tableau correspondant sur la feuille de la poudre testée. Cette feuille peut être au format papier ou directement dans la base de données.

5. Répétition des mesures

Pour cette caractéristiques, les mesures ne sont pas répétées.

6. Nettoyage et rangement de l'appareil

- Retirer la poudre du cylindre et la remettre dans son bocal. Récupérer également la poudre qui s'est échappée sous forme de poussière autour du dispositif.
- Nettoyer les ustensiles, récipients et le poste de travail autour. Retirer toute trace de poudre. (Pinceau et papier industriel sec).
- Nettoyer à l'eau (et au savon si nécessaire) les éléments de l'appareil. Bien les sécher ensuite avant toute utilisation.
- Nettoyer le panneau contenant les capteurs et les régulateurs avec un papier industriel légèrement humidifié.
- Remettre tous les éléments à leur place pour une autre utilisation.
- Ranger la poudre dans son bocal d'échantillon en prenant soin de ne pas la contaminer.
- Ranger le bocal dans l'armoire de stockage des échantillons.

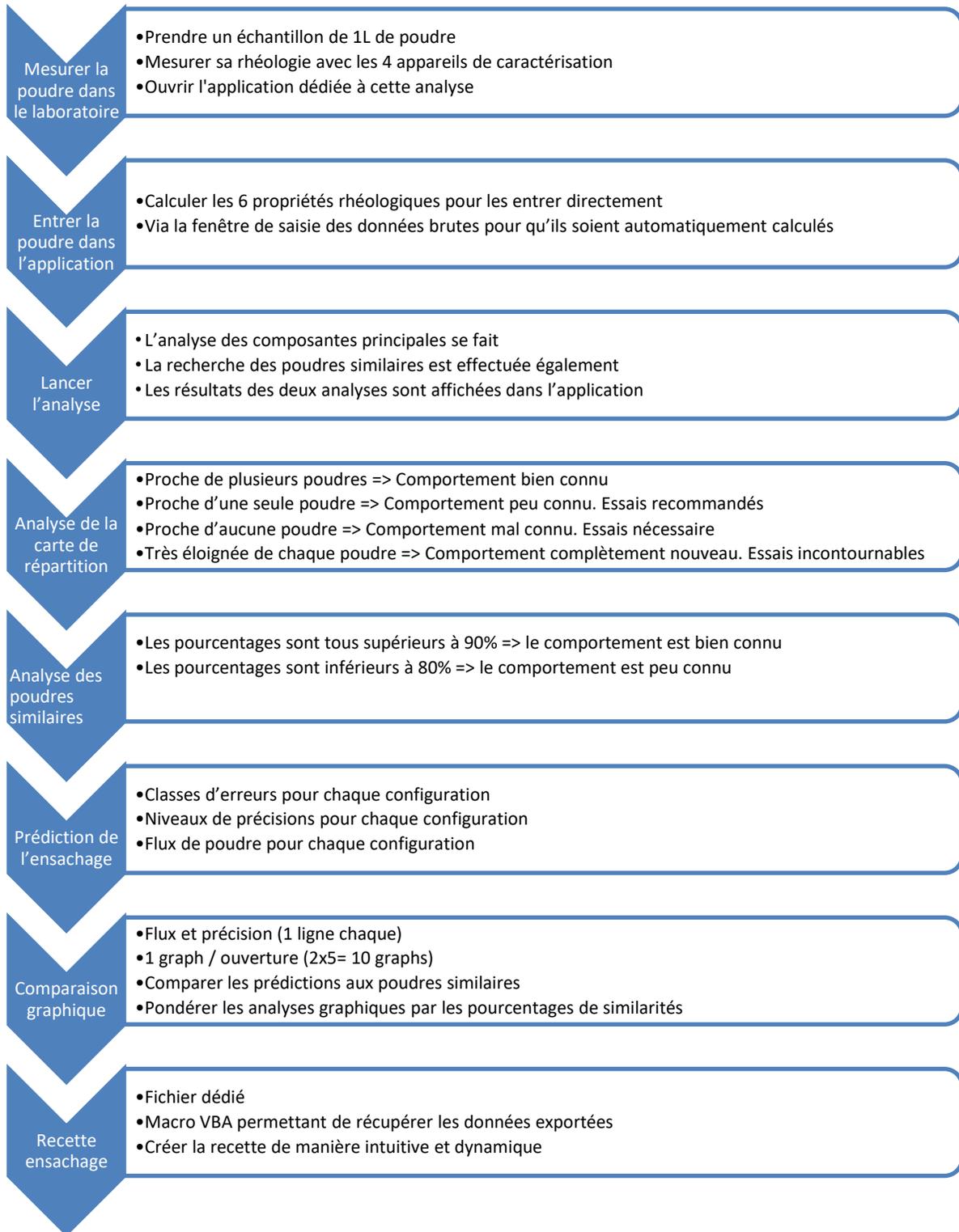
ANNEXE II : TABLEAU DES FONCTIONS DE TABLEUR UTILISÉES

Fonction	Utilité	Utilisation finale
RechercheV (valeur_cherchée , table_matrice , no_index_col)	Retourner une valeur d'une plage de données. La ligne dépend de la valeur cherchée et la colonne du numéro de colonne dans la plage de données.	Permet de retourner les informations à propos de la poudre dans le tableau de résumé (Nom, Type, Client, Date,...)
Indirect (ref_texte)	Retourne une plage de données d'après la chaîne de caractère la définissant. Par exemple, Indirect ("A3 &"!\$C\$4 : \$ D \$ 7") permet d'étudier la plage de données de C4 à D7 pour la feuille dont le nom est écrit en A3	Cette fonction est utilisée pour définir toutes les plages de données dans toutes les fonctions utilisées pour la construction automatique du tableau de résumé.
Index (matrice , no_ligne , no_colonne)	Retourne la valeur contenue dans la case de la plage de donnée « matrice » à la position donnée par les numéros de ligne et de colonne	Utilisé pour récupérer toutes les valeurs
Si (condition , valeur_oui , valeur_non)	Permet d'afficher une valeur ou une autre selon si la condition est vérifiée ou non	Permet d'afficher « 0 » ou un chiffre négatif si des erreurs se produisent par exemple
EstErreur (formule)	Teste la formule et si une erreur survient (division par 0 par exemple), la condition devient vraie	Utilisée en tant que condition dans la fonction « Si »
Moyenne	Donne la moyenne d'une plage de données	Permet de calculer la moyenne des mesures pour le calcul des indicateurs
Stdeva	Donne l'écart-type (déviations standard) d'une plage de données	Permet de calculer l'écart-type des mesures pour le calcul des indicateurs

ANNEXE III : TABLEAU RÉCAPITULATIF DES FONCTIONS ET MODULES PYTHON UTILISÉS

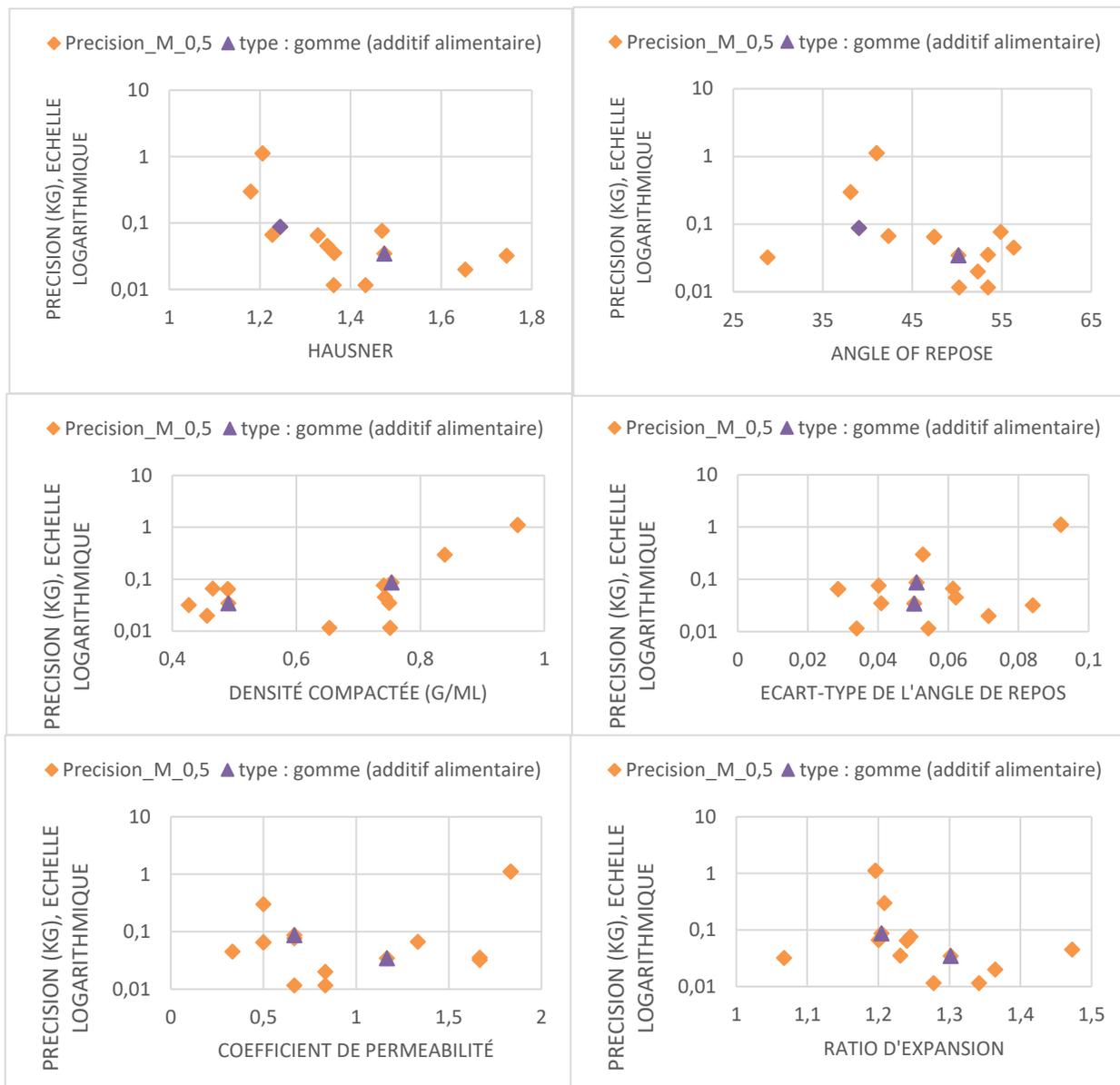
MODULE	FONCTIONS UTILISÉES	UTILITÉ
PANDAS	Read_excel To-excel Dataframe Concat	Importer un tableau Excel Exporter un dictionnaire vers Excel Créer un dictionnaire de données Concaténer deux « dataframes »
SKLEARN (NORMALIZE)	Normalize	Normaliser les données entre 0 et 1
SKLEARN (UTILS. VALIDATION)	Column_or_1D	Reformer les vecteurs 1D
SKLEARN (NEIGHBORS)	KNeighborsClassifier KNeighborsRegressor	Classification selon les « k plus proches voisins » Régression selon le même modèle
SKLEARN (MODEL SELECTION)	cross_val_score	Validation croisée pour le choix des hyperparamètres
SKLEARN (DECOMPOSITION)	PCA	Réduction de la dimension
SKLEARN (LINEAR MODEL)	RidgeCV	Régression linéaire par les moindres carrés régularisés, avec validation croisée intégrée
MATPLOTLIB.PYPLLOT	Figure Subplots Plot scatter figsave	Créer une figure Définir plusieurs zones de tracé Tracer les données (points reliés) Tracer les points uniquement Enregistrer la figure tracée en tant qu'image

ANNEXE IV : ÉTAPES PRINCIPALES DE L'ANALYSE D'UNE POUDRE INCONNUE

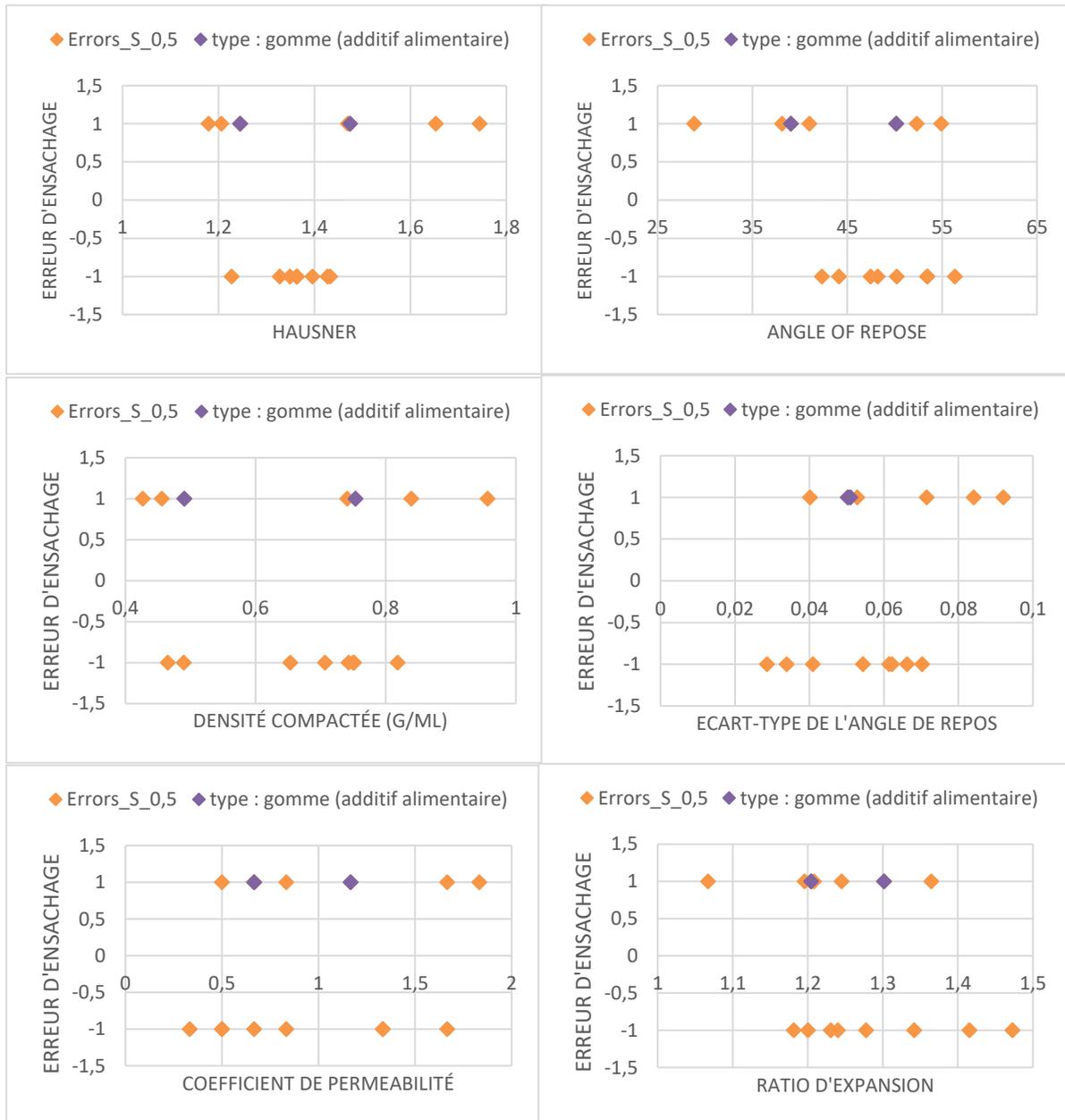


ANNEXE V : GRAPHIQUES D'OBSERVATION DE LA PRÉCISION ET DES ERREURS D'ENSACHAGES POUR UNE CONFIGURATION SÉLECTIONNÉE, POUR CHAQUE PROPRIÉTÉ DES POUDRES

Tracé de la précision d'ensachage, en kg, en fonction de chaque propriété, pour une ouverture M et une vitesse de vis de 0,5 rotations par seconde.



Tracé des erreurs d'ensachage, codées « -2 », « -1 », « 0 » ou « 1 », en fonction de chaque propriété, pour une ouverture S et une vitesse de vis de 0,5 rotations par seconde.



ANNEXE VI : INTERFACE GRAPHIQUE ASSOCIÉE

Dans le but de rendre la manipulation des données et de manière générale toutes les analyses accessibles à n'importe quelle personne sans forcément avoir besoin de manipuler Python, les tableaux ou n'importe quel outil d'analyse, un outil d'affichage est créé en parallèle des études et permet de lancer et d'observer les résultats. Cette interface utilisateur est créée à partir de Python via la librairie PyQt5 développée par Riverbank Computing Limited. Elle permet d'utiliser les outils du logiciel de création d'interfaces Qt et donc utiliser l'outil « QtDesigner » qui permet de construire l'interface de manière intuitive et visuelle. De plus, PyQt5 permet de remplir l'interface grâce à un code interprété sous le langage Python et non en C++ comme c'est le cas de Qt. Cet outil permet à tous les scientifiques souhaitant diffuser leurs programmes et leurs résultats de le faire grâce au langage Python et donc d'éviter de devoir se former à utiliser un autre langage. De plus, la librairie PyQt5 permet d'exporter l'application développée afin de la diffuser en tant qu'application exécutable, sans que l'interpréteur soit au préalable installé sur l'ordinateur qui lance l'application. En effet avec PyQt5, il est possible de créer des fenêtres interconnectées, et d'attribuer des fonctions à des boutons à cliquer. Ainsi l'utilisateur est en mesure d'utiliser toutes les fonctions, toutes les analyses développées et d'observer tous les résultats possibles avec les données. Lorsque la fenêtre et son fonctionnement ainsi que ses fonctions reliées sont exportés en tant qu'exécutable, un interpréteur Python contenant les librairies nécessaires est automatiquement joint à l'exécutable afin de permettre aux objets Python de fonctionner dans l'application. De cette manière, l'utilisateur bénéficie simplement d'une application sous la forme d'une interface utilisateur simple et toute l'utilisation plus complexe du langage de programmation est cachée sous la couche graphique gérée par Windows par le biais de l'interpréteur Python joint à l'application.

L'image ci-dessous montre une capture d'écran de l'application à son lancement. L'interface est en anglais pour les besoins de développement futurs de l'entreprise, toutes les fenêtres montrées dans ce mémoire seront donc en anglais. La première ligne d'éléments permet de sélectionner le bon fichier de données, de l'ouvrir éventuellement, et surtout de

charger les données ou de faire des analyses plus poussées sur les données. En effet, l'analyse des corrélations est disponible directement dans l'application via une sous-fenêtre de navigation, ainsi que les analyses des erreurs de prédictions et d'apprentissages qui seront développées dans la dernière partie de ce mémoire.

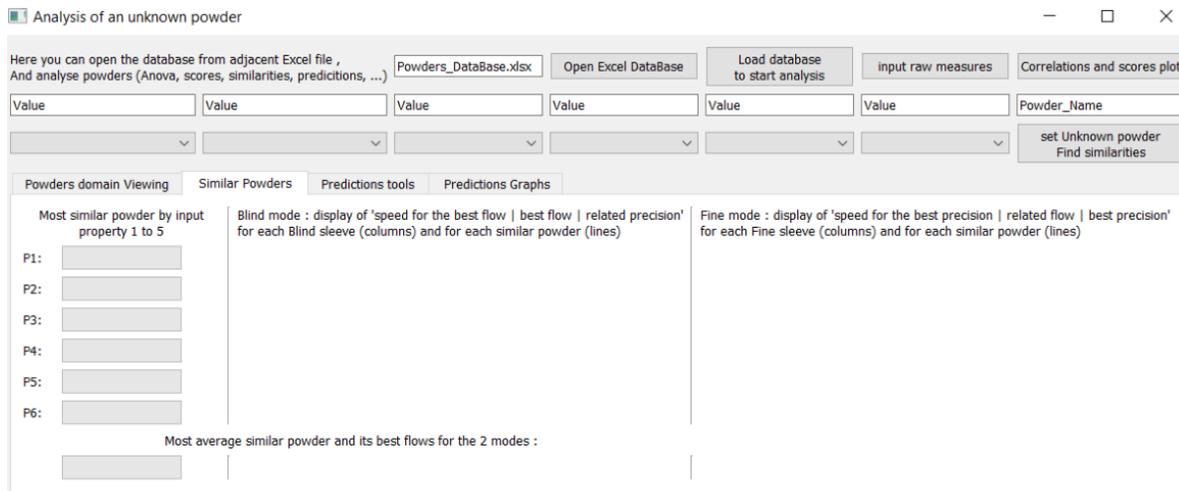


Figure 39 : Fenêtre d'accueil de l'application lors de son lancement

Les deux lignes suivantes sont destinées à la saisie des données d'une poudre à comparer. Il est possible de saisir directement les indicateurs calculés s'ils sont connus ou bien les mesures brutes via une fenêtre de dialogue qui va s'occuper de faire les calculs et de créer le vecteur définissant la poudre à étudier. Ensuite, l'interface permet de lancer les analyses en récupérant les données du fichier contenant les mesures et à appeler les différentes fonctions créées pour manipuler et analyser ces données. Grâce à des boutons et des zones d'affichage dans les différents onglets de la fenêtre, il est donc possible d'analyser complètement une poudre inconnue (les étapes de l'analyse complète sont disponibles en annexe IV) :

- Il est possible de comparer la poudre inconnue avec celles présentes dans la base de données

- Il est possible d'observer son placement dans une carte 2D des poudres connues
- Il est possible de prédire son comportement dans la machine
- Il est possible d'observer graphiquement les prédictions par rapport aux performances connues des poudres similaires
- Il est possible de créer une recette d'ensachage via le fichier dédié qui utilise les performances prédites.

Cette solution présente néanmoins certaines limites : il faut que les fichiers utilisés par l'application restent dans le dossier source. Il est nécessaire de préciser que pour une utilisation intensive et systématique, cette solution reste moins pertinente qu'une application directement développée en C++ ou C# par exemple puisque les allers-retours vers l'interpréteur Python ralentissent grandement les analyses. De plus pour une utilisation sur un réseau d'entreprise cette solution n'est que temporaire puisqu'elle ne comporte pas d'auto sauvegarde, de protection des données, ni de gestion des différents types d'utilisateurs.

Malgré toutes ces limites, l'interface qui a été mise en place pour utiliser les outils développés dans ce projet permet d'ores et déjà de manipuler les données et de fournir des résultats. L'objectif principal était de démystifier l'utilisation de Python en rendant les analyses faciles par n'importe quel utilisateur ce qui est effectivement le cas.

Enfin, une attention particulière est donnée quant à la saisie des données sur cette application. En effet, elle a été pensée pour être utilisée avec des poudres à comparer qui n'ont été mesurées que sur les appareils de caractérisation rhéologique. Dans ces cas-là, il est assez fastidieux d'ouvrir la base de données et d'entrer une nouvelle poudre pour bénéficier des six propriétés qui sont extraites automatiquement par la base de données à partir des mesures. Il est également impensable de calculer ces indicateurs manuellement, et c'est pourquoi ce calcul est possible directement dans l'application. Le bouton « Input raw measures », en 2^e position en partant de la droite sur la première ligne, permet d'ouvrir une fenêtre de dialogue pour entrer les données, illustrée par la figure suivante.

Figure 40 : Fenêtre de saisie manuscrite des mesures brutes de la poudre à étudier

Cette capture d'écran de la fenêtre montre sensiblement la même structure que les tableaux présentés en partie 1 à propos des calculs des indices du comportement rhéologique des poudres. Ainsi ces 4 tableaux récupèrent les mesures sur la poudre inconnue pour calculer les indices adéquats et les afficher directement dans les cases prévues à cet effet dans la page d'accueil de l'application. Cette fenêtre permet donc de s'affranchir du calcul des six propriétés d'études au préalable : seules les mesures brutes sont nécessaires. Néanmoins, si les six propriétés ont été calculées il est plus rapide et donc plus intéressant de les entrer directement via les cases dédiées sur la page d'accueil (illustrée par la Figure 39).

Le développement de cette application ne faisait pas partie intégrante des objectifs ou des attentes du projet. Pourtant devant la complexité de l'utilisation du langage Python pour réaliser les analyses et les prédictions, il a été choisi de faire ce développement en parallèle. Ce travail ne sera donc pas plus approfondi au cours de ce mémoire, mais il est important de noter que l'importance d'une interface graphique est primordiale afin que les outils développés puissent être utilisés après la fin du projet. De plus ceci apporte une dimension plus professionnelle au travail puisqu'une simple formation de quelques minutes permet d'utiliser correctement les outils et d'effectuer les analyses sur les données récoltées.

L'analyse des données par l'observation croisée de leurs tracés qui a été développée dans la section 2.2.2 n'est pas disponible dans l'application. En effet cette analyse n'était pas automatisée et peut être faite dans n'importe quel tableur. Seule la méthode appliquée est importante et surtout utile pour l'analyste. Cette analyse est la seule qui n'est pas accessible via l'interface d'utilisation de la base de données. Toutes les analyses présentées dans la liste précédente sont accessibles via un bouton qui fait l'analyse in situ ou bien renvoie vers un tableur d'analyses. C'est la raison pour laquelle l'analyse par graphiques croisés a été présentée en premier lieu. Dorénavant, tout ce qui sera présenté dans les paragraphes suivants sera accessible directement via l'interface utilisateur. De cette manière, les prochaines méthodes d'analyses et de calculs seront complètement automatisées pour permettre une utilisation facilitée et surtout éviter les erreurs qui pourraient être dues à une manipulation des données.

Enfin, l'annexe IV regroupe les étapes principales de l'analyse d'une poudre inconnue grâce à l'application développée, pour le lecteur qui aurait la curiosité de s'intéresser au fonctionnement de cette application. Les fichiers de code développés en Python ne seront pas fournis à cause de leur taille.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] E. Guyon and J. P. Troadec, Du sac de billes au tas de sable. Editions Odile Jacob, 1994.
- [2] S. F. Edwards, "The rheology of powders," *Rheologica Acta*, journal article vol. 29, no. 6, pp. 493-499, 1990.
- [3] S. Joël, « Rhéologie, texture et texturation des produits alimentaires, » (in fre), *Techniques de l'ingénieur - Opérations unitaires du génie industriel alimentaire*, Article de base documentaire vol. base documentaire : TIB430DUO, no. ref. article : f3300, 2006.
- [4] S. Khashayar et G. Pierre, « Caractérisation et analyse des poudres Propriétés physiques des solides divisés, » (in fre), *Techniques de l'ingénieur Principes de formulation*, Article de base documentaire vol. base documentaire : TIB489DUO, no. ref. article : j2251, 2009.
- [5] S. Khashayar et G. Pierre, « Caractérisation et analyse des poudres Propriétés comportementales des solides divisés, » (in fre), *Techniques de l'ingénieur Principes de formulation*, Article de base documentaire vol. base documentaire : TIB489DUO, no. ref. article : j2252, 2009.
- [6] F. Boschini, V. Delaval, K. Traina, N. Vandewalle, and G. Lumay, "Linking flowability and granulometry of lactose powders," (in English), *International Journal of Pharmaceutics*, Article vol. 494, no. 1, pp. 312-320, 2015.
- [7] H. Pan, R. G. Landers, and F. Liou, "Dynamic Modeling of Powder Delivery Systems in Gravity-Fed Powder Feeders," *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 128, no. 1, pp. 337-345, 2005.
- [8] P. Zamankhan and J. Huang, "Complex Flow Dynamics in Dense Granular Flows—Part II: Simulations," *Journal of Applied Mechanics*, vol. 74, no. 4, pp. 691-702, 2006.
- [9] Y. Wanibe and T. Itoh, "Achievements in New Quantitative Approach to Powder Technology," *Journal of the Japan Society of Powder and Powder Metallurgy*, vol. 47, no. 12, pp. 1291-1299, 2000.

- [10] É. Guyon, J. Y. Delenne, and F. Radjai, *Matière en grains*. Éditions Odile Jacob, 2017.
- [11] N. Sandler and D. Wilson, "Prediction of granule packing and flow behavior based on particle size and shape analysis," (in English), *Journal of Pharmaceutical Sciences*, Article vol. 99, no. 2, pp. 958-968, 2010.
- [12] G. Lumay et al., "Measuring the flowing properties of powders and grains," (in English), *Powder Technology*, Article vol. 224, pp. 19-27, 2012.
- [13] M. Leturia, M. Benali, S. Lagarde, I. Ronga, and K. Saleh, "Characterization of flow properties of cohesive powders: A comparative study of traditional and new testing methods," (in English), *Powder Technology*, Article vol. 253, pp. 406-423, 2014.
- [14] E. H. Gnagne, J. Petit, C. Gaiani, J. Scher, and G. N. Amani, "Characterisation of flow properties of foutou and fofou flours, staple foods in West Africa, using the FT4 powder rheometer," (in English), *Journal of Food Measurement and Characterization*, Article vol. 11, no. 3, pp. 1128-1136, Sep 2017.
- [15] M. Krantz, H. Zhang, and J. Zhu, "Characterization of powder flow: Static and dynamic testing," (in English), *Powder Technology*, Article vol. 194, no. 3, pp. 239-245, 2009.
- [16] E. Guerin, P. Tchoreloff, B. Leclerc, D. Tanguy, M. Deleuil, and G. Couarraze, "Rheological characterization of pharmaceutical powders using tap testing, shear cell and mercury porosimeter," *International Journal of Pharmaceutics*, vol. 189, no. 1, pp. 91-103, 1999.
- [17] R. Freeman, "Measuring the flow properties of consolidated, conditioned and aerated powders— A comparative study using a powder rheometer and a rotational shear cell," (in English), *Powder Technology*, Article vol. 174, no. 1-2, pp. 25-33, 2007.
- [18] Travis E. Oliphant. *A guide to NumPy*, USA: Trelgol Publishing, (2006).
- [19] Stéfan van der Walt, S. Chris Colbert and Gaël Varoquaux. *The NumPy Array: A Structure for Efficient Numerical Computation*, *Computing in Science & Engineering*, **13**, 22-30 (2011).
- [20] Pandas: a Foundational Python Library for Data Analysis and Statistics; presented at PyHPC 2011
- [21] Scikit-learn: Machine Learning in Python, Pedregosa *et al.*, *JMLR* 12, pp. 2825-2830, 2011
- [22] Han, Mengqi, "Characterization of fine particle fluidization" (2015). *Electronic Thesis and Dissertation Repository*. 3073.
- [23] V. Ganesan, K. A. Rosentrater, and K. Muthukumarappan, "Flowability and handling characteristics of bulk solids and powders—a review with implications for DDGS," (in English), *Biosystems Engineering*, Article vol. 101, no. 4, pp. 425-435, 2008.
- [24] V. Landillon, D. Cassan, M. H. Morel, and B. Cuq, "Flowability, cohesive, and granulation properties of wheat powders," (in English), *Journal of Food Engineering*, Article vol. 86, no. 2, pp. 178-193, 2008.
- [25] J. A. H. de Jong, A. C. Hoffmann, and H. J. Finkers, "Properly determine powder flowability to maximize plant output," (in en), *Chemical Engineering Progress*, vol. 95, no. 4, pp. 25 - 34, 1999-4 1999.

