Recherche & Développement

Contrôle et optimisation du moulin avec le SDmatic CHOPIN[1]

Ahmed BENAMARA[2], Arnaud DUBAT[3]

Cet article traite de l'application du SDmatic CHOPIN, outil destiné au laboratoire que le moulin algérien NEOFAR a décidé d'utiliser en production.

Le contexte

L'Algérie est un pays gros consommateur de céréales. Sa consommation annuelle est estimée à 220 kg de blé par habitant. En comparaison, la consommation annuelle des Français, gros consommateurs de pain, est de 50 kg de blé par habitant. En moyenne, depuis 2004, l'Algérie produit chaque année 2,3 millions de tonnes de blé par an et en importe 6 millions de tonnes, ce qui la place parmi les grands pays importateurs mondiaux.

La situation du meunier algérien

Le prix du blé cédé aux moulins est subventionné et fixé par décret, ce qui ramène le prix de la tonne à environ 172 US$ (prix rendu moulin en 2009). Ce prix très soutenu explique celui de la tonne de farine, qui est également plafonné par décret, à 267 US$. L'interdiction de dépasser ce prix de vente farine explique l'attention que les meuniers algériens portent à l'amélioration constante de leur gestion. La rentabilité repose, entre autres, sur la capacité des meuniers à maîtriser les coûts de production et à optimiser la conduite du moulin afin d'assurer la meilleure productivité possible.

Nous n'avons pas non plus la possibilité d'acheter la quantité de blé que nous souhaitons (système de quotas). Chaque moulin reçoit 50 % de sa capacité installée pendant 5 jours de la semaine, ce qui représente environ 35 % de la production théorique sur une semaine complète de 7 jours. Ce qui veut dire que le meunier algérien se trouve obligé d'être extrêmement attentif aux coûts de production, et tout particulièrement aux coûts fixes. Car, avec 35 % de blé, la rentabilisation de l'outil de production ne peut se faire qu'avec une gestion rigoureuse et une vigilance extrême sur tous les coûts de l'entreprise.

Le moulin NEOFAR

Présentation

Neofar est une entreprise familiale créée en 2001. Le moulin, d'une capacité de 150 tonnes/jour, est situé dans la région d'Azazga à 130 km à l'est de la capitale Alger. Il est implanté sur un site de 14 000 m².

Le débit de la réception du blé, avec un pré-nettoyage, est de 100 tonnes/heure. La capacité de stockage est de

Le moulin NEOFAR, Azazga, Algérie.

[1] D'après l'intervention de Ahmed BENAMARA lors du 10e séminaire CHOPIN Technologies à Paris en mai 2009.

[2] Moulin NEOFAR, Azazga, Algérie.

[3] CHOPIN Technologies, Villeneuve la Garenne, France.

10 000 tonnes avec 6 silos de 1500 tonnes chacun et 4 cellules de mélange de 250 tonnes.

Le moulin est classiquement équipé de matériel italien. Le diagramme inclut 4 broyeurs, 3 claqueurs et 6 convertisseurs. La partie laboratoire est aussi complète que possible : Nilemalitre pour le poids spécifique, EM10 pour la teneur en eau, Falling Number 1500 avec broyeur KT120, cendres avec four MLI1100, alvéoconsistographe, tamiseur Rotachoc, protéines et SDmatic.

Le moulin est engagé dans la mise en conformité à la norme ISO 22000.

Les coûts de production

Nous avons conduit une analyse très poussée de nos coûts de production. La **Figure 1** montre que 45 % de nos coûts hors matière première (blé) sont liés aux amortissements, ensuite vient la masse salariale, et l'on remarque que l'électricité est le troisième poste de dépense pour les coûts fixes.
Il est fondamental de surveiller notre consommation énergétique de manière très précise. Notre étude nous a amené à comparer les coûts de l'énergie en Algérie et en France. En Algérie, le coût du kWh peut varier d'un facteur 1 à 7 en fonction du moment de la journée (période de pointe, nuit...). Maîtriser ces périodes peut permettre de substantielles économies. Ensuite, le choix de la puissance installée par l'organisme en charge est aussi important. Enfin, un troisième axe de dépense est lié aux pics de fonctionnement. Les surcoûts liés à ces pics peuvent être minimisés de manière très simple et pragmatique.

Outils pour l'expertise

Le moulin NEOFAR a été créé suite à un contexte économique favorable, mais nous nous sommes vite heurtés au problème du recrutement de meuniers expérimentés. L'entreprise a alors pris la décision de former des jeunes diplômés qui ne sont pas directement issus de formations en meunerie. Un encadrement par des experts en meunerie a permis à cette jeune équipe de s'approprier les bases de la conduite d'un moulin.
C'est ainsi, qu'à tous les niveaux de notre entreprise, des outils rationnels de mesure et des instruments électroniques ont été mis en place afin de reproduire – au mieux – les gestes des meuniers expérimentés.
À titre d'exemples : nous avons intégré le tamisage afin de mesurer la finesse des produits de mouture ; l'ampèremètre nous sert de guide pour régler nos cylindres et voir s'il n'y a pas de problèmes potentiels ; nous mesurons également la température des cylindres avec un thermomètre infrarouge.
Pour compléter cette approche, nous avons intégré le SDmatic, outil de laboratoire que nous avons décidé d'appliquer au suivi de la production.

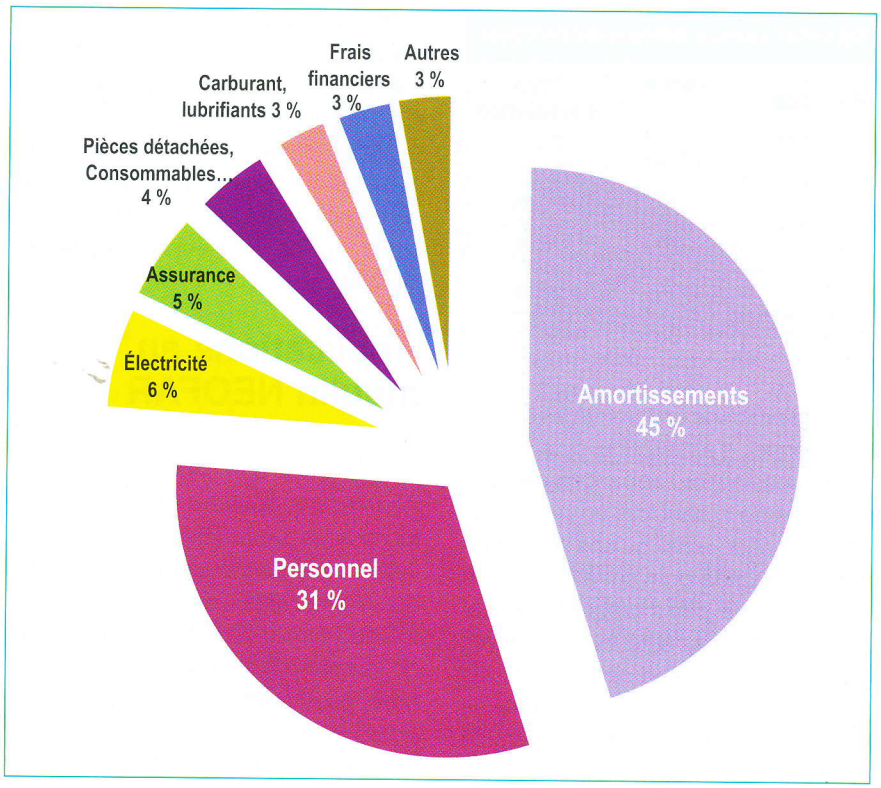


Figure 1. **Répartition des coûts fixes de production.**

Figure 2. **Le SDmatic.**

Le SDmatic et les amidons endommagés

Le SDmatic CHOPIN (**Figure 2**) est un appareil permettant la mesure de l'endommagement de l'amidon en moins de 10 minutes. Le principe de mesure, basé sur l'affinité de l'iode pour l'amidon, a été décrit par DUBAT (2004). Rappelons juste qu'un échantillon de farine est mis en contact avec une solution iodée dont l'appareil mesure l'intensité électrique (µA) proportionnelle à la quantité d'iode libre en solution. Plus l'endommagement de l'amidon est important, plus la quantité d'iode fixée sera importante et moins le courant résiduel en fin de test sera fort. La méthode est normalisée ICC, Afnor et récemment AACC (DUBAT, 2010).

L'importance de l'endommagement de l'amidon sur les caractéristiques rhéologiques des farines a été discutée par divers auteurs (DUBOIS, 1949 ; VIOT, 1992). Il apparaît clairement qu'un

Tableau I. Valeurs témoins recherchées

Passage	Tamis (µm)	Taux d'extraction
B1	1 000	30-35 %
B2	1 000	50 %
B3	670	30 %
CL1	160	50 %
CL2/C1	160	60 %

excès d'amidons endommagés accroît le potentiel d'absorption d'eau mais peut occasionner l'apparition de phénomènes de collant lors du processus de fabrication ainsi qu'une fermentation trop rapide pouvant aller jusqu'à l'obtention de pains plats et intensément colorés. Les auteurs s'accordent à dire, qu'en fonction des blés utilisés *(hard/soft)* et de la destination finale de la farine, il existe un endommagement optimum.

WILLM (1977) a largement contribué à sensibiliser les meuniers au contrôle de l'endommagement de l'amidon. Il a montré que l'endommagement de l'amidon croît en allant des premiers vers les derniers passages et note que cet accroissement est particulièrement sensible sur les cylindres lisses. Il indique aussi que les plus grands pourvoyeurs d'amidons endommagés sont les passages de tête de convertissage et de claquage. WILLM a aussi étudié l'influence du réglage des cylindres (serrage, débit d'alimentation, pression…) et donné des pistes intéressantes permettant d'optimiser l'endommagement global de l'amidon des farines produites.

Applications au moulin NEOFAR

Avant tout, il nous faut insister sur un point essentiel qui conditionne toutes les informations données dans ce document : nous avons déterminé *a priori* une valeur cible de teneur en amidons endommagés, appelée : point optimum de fonctionnement. C'est à partir de ce point de fonctionnement que nous jugeons si nous nous approchons ou nous éloignons de notre cible. Il est important de bien considérer que toutes les valeurs chiffrées sont complètement relatives et ne sont valables que par rapport à notre point optimum de fonctionnement.

À titre d'exemples, pour le pain type « baguette française » nous produisons une farine dont le taux d'endommagement de l'amidon est compris entre 17 et 19 UCD. Ce taux pourra monter jusqu'à 19-21 UCD pour la farine destinée au pain en moule produite à partir de blés *hard*, et descendre à 14-16 UCD pour les farines biscuitières.

En termes de fréquence d'analyse, nous oscillons entre 1 et 3 tests quotidiens en fonctionnement normal ; les mesures sont systématiques lors des changements de blés et lors de chaque intervention humaine sur le moulin. Notre système de traçabilité est d'ailleurs basé sur des numéros de lots automatiquement incrémentés dès qu'il y a intervention, quelle qu'elle soit. Ce système permet à chaque responsable du moulin d'être informé en temps réel de tout ce qui se passe sur le moulin.

Diagramme de mouture et amidons endommagés

En ce qui concerne le tamisage, le **Tableau I** donne un aperçu des valeurs témoins que nous recherchons. Le **Tableau II** montre les résultats de l'étude des farines de passages, la première colonne correspond à l'extraction moyenne du passage et la seconde au niveau d'endommagement de l'amidon en UCD (ici pour une farine panifiable type 55). Cette étude nous a rapidement permis d'apercevoir le potentiel du SDmatic en tant qu'outil de contrôle du processus de fabrication.

Tableau II. Analyse des farines de passage, taux d'extraction et endommagement de l'amidon.

Passage	Taux d'extraction (%)		Amidon endommagé	
			UCD	%
B1	6,8	21	16,5	6,5
B2	7,9		17,1	7,9
B3	5,3		16,9	5,2
B4	1		17,1	1,0
CL1	15,7	65	18,0	16,4
CL2/C1	18		17,5	18,3
CL3	2,8		22,3	3,6
C2	17,7		13,9	14,3
C3	10,8		14,1	8,9
C4	1,8	14	20,6	2,2
C5	1,9		23,1	2,6
C6	1		25,0	1,5
Vibro	5,4		26,8	8,4
Sécheur	3,9		12,6	2,9
Type 55	100	100	17,2	100

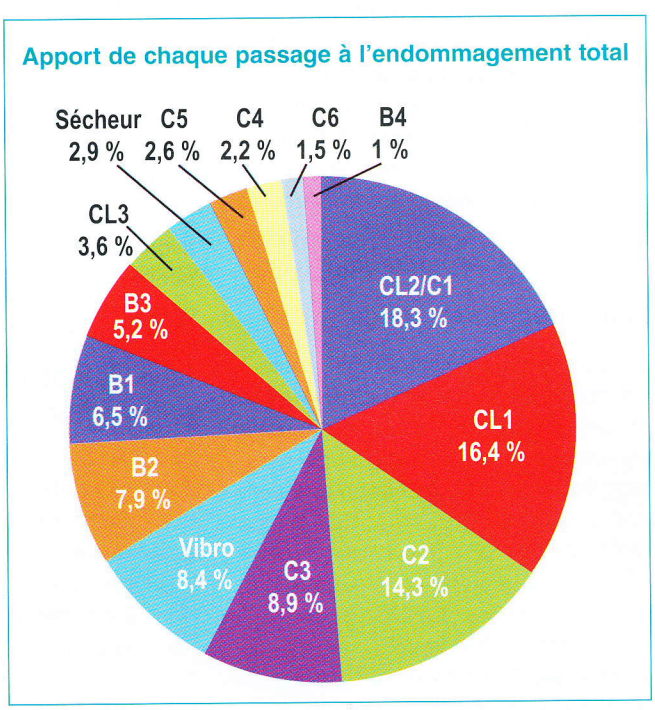


Figure 3. **Pourcentage d'amidons endommagés apporté par chaque passage du diagramme de mouture.**

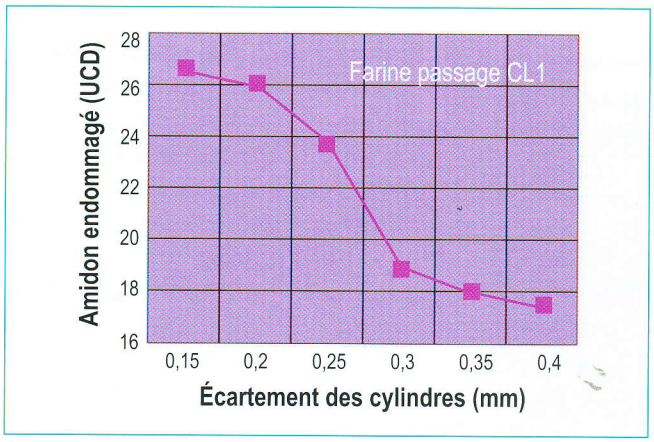


Figure 4. **Relation entre le serrage des cylindres et le taux d'amidons endommagés (ici CL1).**

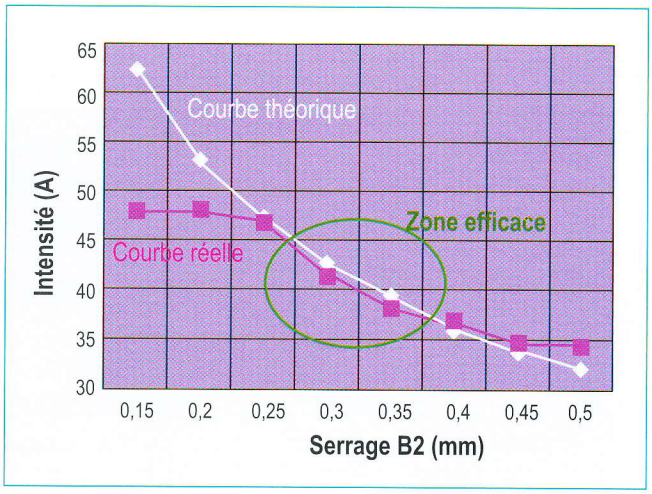


Figure 5. **Évolution de la consommation électrique en fonction du serrage des cylindres.**

Le broyage n'apportant que 21 % de la farine totale, s'il se passait quelque chose sur cette partie, son influence serait limitée. Nous apportons beaucoup d'attention aux têtes de passages, confirmant ainsi les observations faites par WILLM (1977). Compte tenu de la faible quantité de farine obtenue sur les passages de C5 et C6, nous ne nous focalisons pas sur ces passages. Par contre, nous observons de très près ce qui se passe sur les passages de tête de claquage/convertissage (CL1, CL2/C1, C2, C3) qui sont les plus importants pour la maîtrise du taux d'endommagement de l'amidon.

Nous avons aussi remarqué que l'endommagement de l'amidon semble suivre la loi arithmétique des mélanges. Il est possible de calculer l'apport de chaque passage à l'endommagement total en multipliant le taux d'amidons endommagés de chaque passage par le taux d'extraction du dit passage. La somme arithmétique permet de prédire un endommagement total de la farine complète à 17,1 UCD, très proche de la mesure réelle (17,2 UCD). Cette analyse montre clairement que 80 % de l'endommagement total de l'amidon de la farine sont principalement régis par les 6 passages de tête (B1, B2, CL1, CL2/C1, C2, C3) (**Figure 3**).

Serrage des cylindres et amidons endommagés

Le serrage des cylindres influence le taux d'amidons endommagés (DUBAT, 2004). En effectuant nos mesures, nous avons clairement mis en évidence que le taux d'amidons endommagés est relié à l'écartement des cylindres par une courbe sigmoïde (**Figure 4**).

Considérons notre point optimum de fonctionnement (notre valeur cible) que nous avons établi à 21 UCD sur la Figure 4 et qui correspond à un écartement de 0,27 mm. À partir de ce point, si nous serrons les cylindres, nous observons dans un premier temps une importante augmentation de l'endommagement de l'amidon. Mais au-delà d'un certain point, le serrage ne permet plus d'augmenter davantage l'endommagement. À partir du même point, si nous desserrons les cylindres, on assiste d'abord à une diminution importante de l'endommagement qui atteint une valeur limite lorsque les cylindres sont tellement desserrés qu'ils n'endommagent plus l'amidon sur le passage considéré. Il est important de prendre en considération ces phénomènes de saturation vers le haut et vers le bas, quel que soit le type d'appareils (cylindres cannelés ou lisses). Au final, la zone utile pour intervenir se situe sur la partie linéaire de la courbe sigmoïde de la Figure 4.

L'usure des cylindres dépend de multiples facteurs. Nous noterons la qualité même des cylindres, la qualité du nettoyage du blé, la quantité de blé broyé, la vitrosité du blé et son conditionnement ainsi que le serrage des cylindres. Cette usure a diverses répercussions sur le processus de mouture parmi lesquelles nous relèverons une extraction plus faible, une énergie électrique consommée plus importante, un échauffement des produits mais aussi des difficultés de tamisage des produits et l'altération de leur qualité.

Surveillance de la consommation électrique

La **Figure 5** représente l'évolution de la consommation électrique en fonction du serrage (courbe rose). La courbe blanche correspond à une courbe théorique, de type exponentielle, qui s'établit autour d'un point de fonctionnement que nous considérons comme idéal pour nous. Ceci semblerait indiquer qu'il est possible de maîtriser ce serrage avec un ampèremètre. Mais il faut bien considérer que les valeurs montrées ici sont des valeurs moyennes. Par exemple, pour un point indiqué à 40 A, la mesure oscille facilement entre 35 et 43 A, tout dépendant du flux de matière qui arrive.

Afin de permettre une analyse chiffrée, nous avons analysé l'impact économique d'un mauvais réglage sur le passage B2, pour une puissance nominale de 22 kW, ce qui est la norme pour notre moulin. Si l'on se réfère à la Figure 5, on se rend compte que le « mauvais réglage » est vite arrivé et peut avoir un impact important sur la consommation électrique. Un tour de serrage d'appareil à cylindre fait augmenter l'ampérage moyen de 6 A (de 37 à 43 A), ce qui, en ignorant ce mauvais réglage pendant un an, peut coûter en Algérie jusqu'à 840 US$ compte tenu du prix du kWh, ce qui équivaudrait en France à 3250 € pour un kWh à 0,125 €.

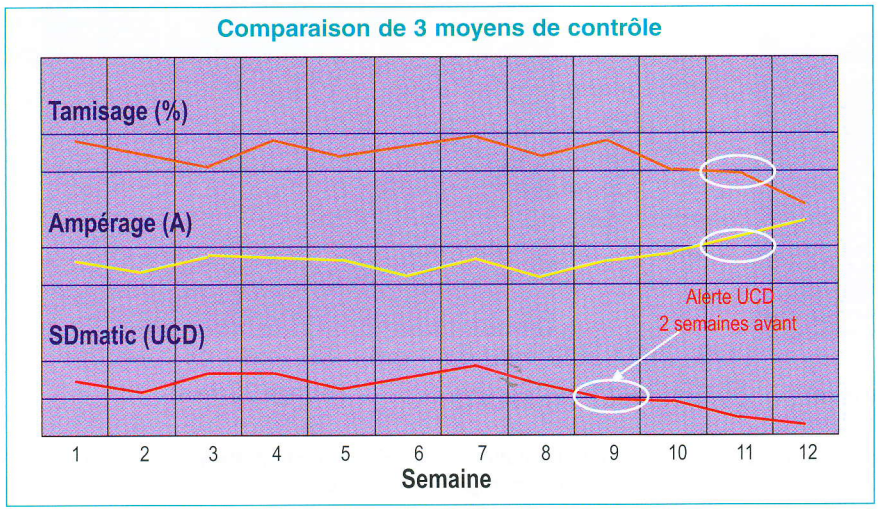


Figure 6. **Cartes de contrôle du B2 avec 3 outils : tamisage, ampèremètre et SDmatic.**

La **Figure 6** montre les cartes de contrôle du B2 au cours du temps avec 3 outils différents. Nous étudions le tamisage (valeur cible = valeur moyenne d'extraction sur un tamis de 1000 micromètres), l'ampérage (valeur cible = 37 A) et l'endommagement de l'amidon (valeur cible = 17,1 UCD). Les deux premières méthodes, traditionnellement utilisées par les meuniers, permettent de détecter le mauvais réglage des cylindres à partir de la 11e semaine. Le contrôle par SDmatic fait apparaître l'information dès la 9e semaine. Cette mesure objective permet donc une meilleure réactivité qui se convertit en économies facilement calculables. Dans l'exemple présent, l'anticipation de 2 semaines permet d'éviter un surcoût énergétique de 175 € pour un seul passage.

L'usure des cylindres est aussi synonyme de perte en taux d'extraction. À titre d'exemple : une perte de 1 % de taux d'extraction sur une base de référence de prix algériens se chiffre aux environs de 2640 US$ pour 15 jours.

Conclusions

Le SDmatic est un appareil conçu pour le laboratoire qui peut toutefois être utilisé pour contrôler le processus de fabrication et en particulier pour prévenir l'usure des cylindres. Notre expérience nous a démontré que le SDmatic permettait de détecter cette usure près de 2 semaines plus tôt que les autres méthodes communément utilisées en minoterie. Le retour sur investissement a ainsi pu s'établir aux alentours de 23 mois en prenant en compte la situation algérienne, ce qui est déjà appréciable. L'extrapolation de cette situation à un moulin comparable en France ramène le temps de retour sur investissement à seulement 11 mois. ■

Références bibliographiques

DUBAT A., 2004. Importance de l'endommagement de l'amidon et évolution des méthodes de mesure. *Industries des Céréales*, **137**, 2-8.

DUBAT A., 2010. Collaborative study concerned with measuring damaged starch using an amperometric method. *Cereal Foods World*, **52(6)**, 319-323.

DUBOIS M., 1949. Incidences du réglage de la mouture sur les propriétés des farines. *Bulletin EFM*, **113**, 170-187.

VIOT D., 1992. Amidons endommagés, ni trop, ni trop peu. *Industries des Céréales*, **76**, 25-28.

WILLM C., 1977. Contribution à l'étude de l'endommagement de l'amidon en mouture de blé tendre. *Bulletin EFM*, **277**, 13-25.

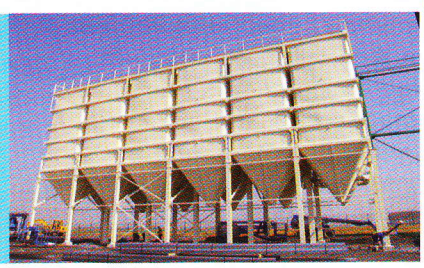
PRÉSENT AUX 62es JTIC

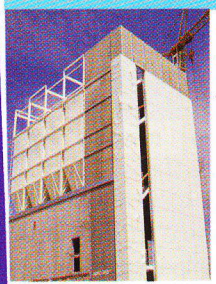
Des silos de stockage "intelligents"

(système breveté)

La SA GODIN a développé, autour du stockage vrac, un concept novateur capable de répondre aux contraintes d'espace, de produit et de temps d'immobilisation.

Réalisations :
Toutes unités de stockage de pulvérulents
- Agro-industrie
- Industries :
- Transformation de matières premières
- Carrières, chaux, etc...





Ces structures représentent un investissement important en terme de temps de recherche et d'étude et font l'objet d'un brevet. De formes carrées ou rectangulaires, conçues en acier ou en inox, elles sont modulaires et adaptées à vos besoins.

Des tôles lisses à l'intérieur et des arrondis dans les angles sont présents pour garantir un écoulement parfait et confèrent à l'ensemble un caractère autoporteur, qui leur permettent d'être livrées monoblocs, entièrement réalisées en atelier.

Profil de votre réussite

GODIN

ZI de la Saulaie - BP 44 - 49700 Doué La Fontaine
Tél. +33 (2) 41 59 18 82 - Fax. +33 (2) 41 59 76 41
Courriel : sa-godin@godin-stockage.com