

## Note technique : méthodes de contrôle de l'humidité EN0077 pour les systèmes de dosage

Résumé : Définit les méthodes de contrôle de l'humidité dans les systèmes de dosage

Produits concernés : Tous les produits

Date de révision : 15/10/2024 Auteur : S.Cook

---

## 1 Résumé

Cette note technique explique les méthodes de contrôle de l'humidité pour les systèmes de dosage. Un système de dosage consiste en plusieurs silos ou trémies de matières premières, ainsi qu'un malaxeur qui les mélange en vue de créer un produit final.

L'intégralité de cette note technique utilise le système de mesure international. Elle suppose également que la densité de l'eau est de 1. Elle ne tient pas compte des changements de densité de l'eau à différentes températures car ces changements sont négligeables.

## 2 Silos et trémies

Les formules ou recettes sont le plus souvent spécifiées en utilisant le poids du matériau à sec. En pratique, il est assez courant que les matériaux contiennent de l'humidité. Ceci affecte le poids du matériau et sa masse volumique. Ce changement au niveau de la masse volumique provient soit de l'expansion des particules elles-mêmes, par exemple les graines de céréales, soit du fait que la tension superficielle du matériau change, par exemple le sable qui, à certaines teneurs en humidité, s'agglutine.

### 2.1 Dosage par volume

Le changement de volume dû à l'humidité est difficile à mesurer, il est souvent non-linéaire et il est donc très difficile d'établir le réglage qui convient en fonction de l'humidité. Hydronix recommande que les systèmes volumétriques soient remplacés par des systèmes basés sur le poids.

### 2.2 Dosage par poids

Le changement de poids dû à l'humidité est un changement linéaire. Même s'il est vrai que la densité de l'eau change en fonction de la température, à tous égards pratiques, on peut la traiter avec une constante de 1. Ceci permet de simplifier le processus de contrôle, car l'on considère qu'1 litre d'eau équivaut à 1 kg.

#### Exemple :

Poids du matériau 1 000 kg

Teneur en humidité = 10 %

$1\ 000 \times 0,1 = 100$  kg d'eau

Densité d'eau @ 0 °C (temp. de réf. 20 °C) = 1,002

$100\text{ kg} / 1,002 = 99,8$  L

Densité d'eau @ 37,8 °C (temp. de réf. 20 °C) = 0,995

$100\text{ kg} / 0,995 = 100,5$  L

Ce changement est inférieur à la précision que l'on peut obtenir d'un système industriel de dosage au poids, alors le reste de cette note suppose une densité d'eau égale à 1. On suppose également que toutes les données du matériau sont fournies en vertu de cette hypothèse.

Pour que les systèmes de dosage au poids pèsent le matériau avec précision et rapidité, il est tout d'abord nécessaire de doser une grande proportion du matériau (ce qu'on appelle la dose principale), de peser le matériau qui a été dosé, et ensuite d'ajouter le reste des matériaux requis plus lentement, par une série de fines doses. Une fine dose consiste à ouvrir la porte pendant une brève période de temps, pour laisser passer une petite quantité de matériaux, avant de la refermer. Le matériau est pesé après chaque fine dose, jusqu'à ce que la quantité de matériaux requise soit ajoutée.

Le contrôle de l'humidité peut être intégré à ce processus, sans affecter la durée d'ensemble du dosage. Le poids définitif cible peut être ajusté avant le fin dosage. Ceci dépend du changement attendu d'humidité dans le matériau. La dose principale doit être réglée à un niveau inférieur à la plage d'humidité du matériau. Comme à ce stade la pesée est moins précise, il est conseillé d'ajouter une tolérance de 5 % à la valeur, pour tenir compte de tout dépassement ou insuffisance par rapport à la cible.

**Exemple :**

*Humidité la plus basse attendue = 3 %*

*Humidité la plus élevée attendue = 18 %*

*Tolérance = 5 %*

*Plage d'humidité = 18 - 3 = 15 %*

*Dose principale = 100 - 15 - 5 = 80 %*

Pour la dose principale, il est important de calculer la moyenne des mesures d'humidité de la sonde. L'humidité variera sur toute la dose, et la compensation doit reposer sur l'humidité d'ensemble et non pas sur une lecture unique à la fin du lot.

La moyenne doit être calculée en utilisant la fonction Moyenne/Maintien fournie par les sondes Hydronix. Ceci élimine les erreurs éventuelles qui pourraient se produire lors du relevé des résultats de la sonde sur la boucle analogique, les résultats tels que le bruit sur le câble ou la résolution d'une entrée de carte analogique.

Le calcul de moyenne de la sonde peut être utilisé soit en mettant sous tension l'entrée numérique de la sonde, soit via la connexion RS485.

Après la dose principale, la valeur moyenne est maintenue. Elle peut être obtenue de la sonde et le poids définitif cible peut être ajusté. Pour calculer le poids réel du matériau qui doit être pesé, la formule suivante doit être appliquée :

$$T = T_d(100 \% + M \%)$$

**Figure 1 : calcul du poids humide**

Où :

T = Poids total du matériau à ajouter

T<sub>d</sub> = Poids sec du matériau exigé pour la dose

M = Humidité du matériau (NB : 100 % = 1, M % = humidité/100)

**Exemple :**

*Poids sec cible de matériau = 1 000 kg*

*Dose principale = 80 %*

*Dose principale cible = 1 000 x 0,8 = 800 kg*

*Poids réel de la dose principale = 780 kg (avec tolérance en cas d'erreur de pesée)*

*Humidité moyenne = 10 %*

*Cible finale = 1 000 x (100 % + 10 %) = 1 000 x (1 + 0,1) = 1 100 kg*

## 2.2.1 Processus de contrôle

Pour les systèmes dont la trémie/le silo ne contiendra jamais qu'un seul matériau, il est recommandé de maintenir l'étalonnage dans la sonde et de veiller à ce que la sortie de la sonde soit réglée de manière à fournir l'humidité moyenne. Pour les systèmes qui pourraient contenir plusieurs matériaux à différents moments, il est recommandé de régler la sortie de la sonde à la valeur moyenne non calibrée. L'étalonnage doit ensuite être effectué dans le système de contrôle.

**Pseudo code pour le processus de dosage de la trémie/du silo lorsque la sonde est configurée à l'humidité de sortie.**

1. Réglez la dose principale cible à un pourcentage de la cible définitive qui permet un dépassement plus une variation d'humidité (Note : dans l'exemple ci-dessus, il s'agissait de 80 %).
2. Ouvrez la porte de la trémie/du silo.
3. Commencez à calculer la moyenne dans la sonde, soit en mettant sous tension l'entrée numérique, soit en envoyant une commande de commencement du calcul de la moyenne via RS485.
4. Tant que la pesée est inférieure à la cible, maintenez la porte ouverte jusqu'à ce que la cible soit atteinte.
5. Arrêtez de calculer la moyenne, soit en mettant hors tension l'entrée numérique, soit en envoyant une commande d'arrêt du calcul de la moyenne via RS485.
6. Fermez la porte de la trémie/du silo.
7. Faites un relevé de l'humidité moyenne de la sonde et calculez le poids cible définitif en utilisant l'équation de la figure 1.
8. Tant que la pesée est inférieure à la cible finale, ouvrez et fermez la porte pendant de brèves périodes (fin dosage) jusqu'à ce que la cible définitive soit conforme à la tolérance acceptable.

Pour les systèmes qui doivent maintenir plusieurs étalonnages, il est nécessaire de calculer l'humidité à partir de la valeur non calibrée. Ce calcul est simple, car la réaction de la sonde à l'ajout d'humidité est linéaire :

$$\text{Humidité \%} = B \cdot \text{Non calibré} + C - D$$

**Figure 2 : Calcul de l'humidité à partir de la valeur non calibrée**

Où :

B = changement non calibré par changement du % d'humidité (gradient)

C = Décalage (valeur non calibrée théorique quand l'humidité = 0)

D = valeur d'adsorption

**Note : la valeur D est uniquement requise si l'humidité libre, et non pas l'humidité totale, sera affichée, sinon elle peut être réglée à 0.**

## 2.2.2 Étalonnage du matériau

Pendant l'étalonnage du matériau, la teneur en humidité du matériau et la valeur non calibrée à cette humidité doivent être relevées en plusieurs points, de préférence sur la plage opérationnelle intégrale du matériau. La plage opérationnelle du matériau s'étend de l'humidité la plus basse à l'humidité la plus haute du matériau pendant la production. Il est recommandé d'avoir au moins 3 points sur la plage opérationnelle. Les sondes Hydronix ne peuvent pas être utilisées pour mesurer des humidités inférieures à la valeur d'adsorption d'eau d'un matériau, alors il est recommandé de maintenir les matériaux au-dessus de cette valeur.

**Exemple :**

Un sable a une valeur d'adsorption d'eau de 1,5 % et il est saturé à 16 %.

Pendant la production, l'humidité du sable sera maintenue entre 2 % minimum et 8 % maximum, pour éviter que l'eau ajoutée au sable ne dépasse le niveau d'eau cible.

La plage opérationnelle se situe donc entre 2 et 8 %.

Des échantillons devraient être prélevés pour le sable à environ 2, 5 et 8 %.

Pour calculer les valeurs B et C de plusieurs points, même s'il existe de nombreuses méthodes, la régression linéaire avec la technique des moindres carrés est peut-être la plus courante. C'est la méthode que recommande Hydronix.

$$B = \frac{\sum \text{Valeurs d'humidité} \cdot \text{Valeurs non calibrées} - \left( \frac{\sum \text{Valeurs d'humidité} \cdot \sum \text{Valeurs non calibrées}}{\text{Nombre de points}} \right)}{\sum \text{Valeurs non calibrées}^2 - \left( \frac{\sum \text{Valeurs non calibrées} \cdot \sum \text{Valeurs non calibrées}}{\text{Nombre de points}} \right)}$$

**Figure 3 : Calcul de la valeur B**

$$C = \frac{\sum \text{Valeurs d'humidité} - B \cdot \sum \text{Valeurs non calibrées}}{\text{Nombre de points}}$$

**Figure 4 : Calcul de la valeur C**

**Exemple**

Non calibré	Humidité
20	2
30	5
40	8

$$B = \frac{((20 \cdot 2) + (30 \cdot 5) + (40 \cdot 8)) - ((2 + 5 + 8) \cdot (20 + 30 + 40) / 3)}{((20 + 30 + 40) \cdot (20 + 30 + 40) / 3) - ((20^2 + 30^2 + 40^2) - ((20 + 30 + 40) \cdot (20 + 30 + 40) / 3))}$$

$$B = (510 - (15 \cdot 90 / 3)) / ((400 + 900 + 1600) - (90 \cdot 90 / 3))$$

$$B = 60 / (2900 - 2700)$$

$$B = 60 / 200$$

$$B = 0,3$$

$$C = ((2 + 5 + 8) - 0,3 \cdot (20 + 30 + 40)) / 3$$

$$C = (15 - 27) / 3$$

$$C = -4$$

### 3 Malaxeurs

L'humidité dans les malaxeurs est généralement contrôlée en ajoutant de l'eau jusqu'à ce que la valeur cible soit atteinte. Ceci peut être fait en utilisant une méthode de calcul ou une méthode d'alimentation variable. La méthode de calcul nécessite de mesurer l'humidité du matériau et ensuite de calculer la quantité d'eau à ajouter en une dose.

**La méthode de calcul nécessite d'avoir les poids secs exacts des matériaux.**

**La méthode d'alimentation variable supporte mieux les poids secs inexacts mais elle est plus lente que la méthode de calcul.**

**La méthode d'alimentation variable exige la disponibilité d'une pression d'eau uniforme.**

Ce document traite des processus de contrôle qu'implique chaque méthode. Pour davantage d'explications sur l'utilisation de chaque méthode, voir les chapitres 4 et 5 du document HD1048, le guide de l'opérateur de l'Hydro-Control (HC07).

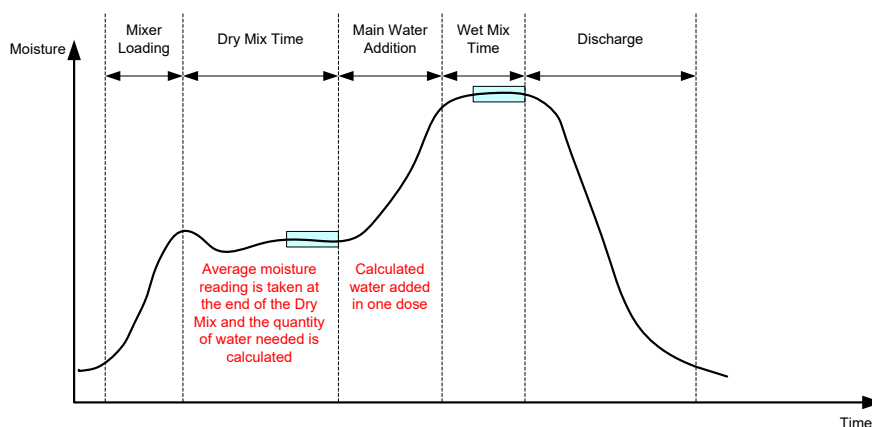
Dans le guide HD1048, le mode de calcul est désigné par le mode « CALC ». La méthode d'alimentation variable est désignée par le mode « AUTO ».

Il est important de noter que le malaxage, contrairement aux trémies et silos qui contiennent généralement un seul matériau à la fois, nécessite de mélanger plusieurs matériaux ensemble.

On peut considérer un mélange de matériaux comme un matériau dans la mesure où les matériaux qui le composent conservent les mêmes proportions et ont suffisamment de temps pour se mélanger et devenir homogènes. On désigne généralement un mélange de matériaux par les termes « recette » ou « formule », selon le type d'industrie. Il s'agit essentiellement de la même chose.

Un cycle de mélange se déroule comme suit :

1. Ajouter les matériaux
2. Mélanger les matériaux jusqu'à obtention d'un signal stable
3. Ajouter de l'eau
4. Mélanger les matériaux et l'eau jusqu'à obtention d'un signal stable
5. Décharger le matériau

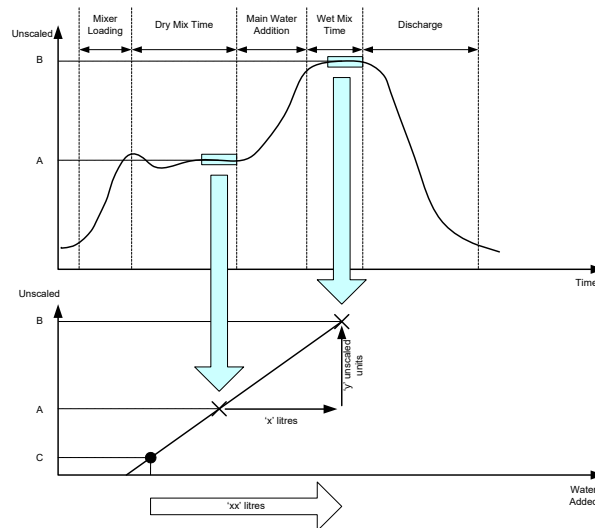


**Figure 5 - Cycle de malaxage**

Il sera peut-être nécessaire de recommencer les étapes 2 à 4 si différents matériaux doivent être ajoutés à différentes étapes ou si l'ajout de matériaux (comme des métaux) produit un effet négatif sur le signal de la sonde.

### 3.1 Mise en pratique de la méthode de calcul

Pour calculer la quantité d'eau à ajouter, la valeur non calibrée de la sonde doit être utilisée. Pour effectuer le calcul, il est nécessaire de permettre à l'opérateur d'utiliser une méthode manuelle par laquelle une quantité d'eau prédéterminée peut être ajoutée, sur la base de la conception de la recette et des connaissances des opérateurs quant à la teneur en humidité des matériaux entrants. Ceci permettra à l'opérateur de créer un mélange de référence. La figure 6 montre le processus du mélange de référence



**Figure 6: Les points d'étalonnage du cycle de malaxage**

On obtient une mesure stable à la fin de la période de malaxage à sec et à la fin de la période de malaxage humide. Il est recommandé de calculer la moyenne du signal de la sonde pendant au moins cinq secondes.

Le changement non calibré de l'augmentation d'humidité par unité (le gradient du graphe) peut être calculé comme illustré en figure 7.

$$B = \frac{100 \cdot Eau}{Poids\ sec(Non\ calibré_{humide} - Non\ calibré_{sec})}$$

*NB : la valeur 100 est un facteur d'échelle qui permet d'utiliser la valeur B dans l'équation de la figure 2.*

#### Figure 7 : calcul du gradient d'ajout d'eau

À noter que le poids sec est le poids sec total de tous les matériaux ajoutés, hormis l'eau et toute humidité qui se trouvent déjà dans le matériau entrant.

Dans la recette, la valeur du mélange humide et la valeur B devraient être enregistrées pour utilisation pendant la production. Pour calculer la quantité d'eau à ajouter à une recette ou formulation à sec, l'équation de la figure 8 peut être utilisée.

$$Eau\ requise = \frac{Poids\ sec : B \cdot (Non\ calibré_{cible} - Non\ calibré_{actuel})}{100}$$

**Note : la valeur 100 est un facteur d'échelle qui permet d'utiliser la valeur B dans l'équation de la figure 2.**

#### Figure 8 : calcul de l'eau requise pendant un mélange

Pour calculer une valeur d'humidité, il est nécessaire d'appliquer un décalage. Le calcul d'un décalage nécessite que l'utilisateur indique la valeur d'humidité définitive. Elle peut être obtenue soit en testant le produit fini en laboratoire soit, si ce n'est pas possible (par exemple dans la production de ciment où une réaction chimique commence à convertir l'eau en une autre substance), la teneur en humidité peut être calculée en utilisant la figure 9.

$$\%Humidité\ Définitive = \frac{100(Eau\ dans\ les\ matières\ premières + eau\ ajoutée\ pendant\ le\ mélange)}{Poids\ à\ sec\ total\ des\ matériaux}$$

**Figure 9 : calculer l'humidité définitive du produit**

Pour convertir la valeur non calibrée de la sonde à la teneur en humidité, à des fins d'affichage, le décalage doit être calculé comme indiqué en figure 10.

$$C = Humidité_{cible} - Non\ calibrée_{cible} \cdot B$$

**Figure 10 : calculer le décalage pour l'étalonnage**

Il est alors possible d'afficher l'humidité en utilisant l'équation de la figure 2.

### 3.2 Mise en place de la méthode d'alimentation variable

La forme la plus efficace de méthode d'alimentation variable nécessite de modifier le débit d'eau de manière à ce que, lorsque l'eau commence à être ajoutée, le débit soit élevé et, au fur et à mesure que le niveau d'humidité de la recette se rapproche de l'humidité cible, le débit soit réduit pour ne pas dépasser la cible. Le moyen utilisé le plus courant consiste à mettre en place un régulateur proportionnel intégral dérivé (Régulateur PID). La plupart des systèmes PLC ont des régulateurs PID, au titre de blocs fonctionnels intégrés.

Pour une explication plus détaillée d'un régulateur PID, voir le chapitre 9, section 3.3 du document HD1048.

Si une valve proportionnelle est jointe au système de malaxage, ceci est relativement simple à effectuer. Le système doit enregistrer une valeur de gain proportionnel, une valeur de gain intégral et une valeur de gain dérivatif. Comme les systèmes de malaxage ne peuvent pas se rétablir d'un dépassement (trop d'eau), la valeur dérivative devrait être réglée à 0.

La sortie de contrôle pour la valve proportionnelle peut alors être calculée en utilisant l'équation suivante.

$$u(t) = MV(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{d}{dt} e(t)$$

où

$K_p$  Gain proportionnel, un paramètre de réglage

$K_i$  Gain intégral, un paramètre de réglage

$K_d$  Gain dérivatif, un paramètre de réglage

$e$  Erreur = valeur cible (non calibrée) - Valeur actuelle (non calibrée)

$t$  Heure ou heure immédiate (le présent)

$T$  Variable d'intégration ; prend les valeurs de l'heure 0 au présent  $t$ .

MV(t) = variable manipulée (ou Sortie de contrôle). Limitée à 0-100 dans le cas d'une valve.

En somme, la partie proportionnelle est un simple rapport d'erreur, alors plus l'erreur est importante, plus la réaction est importante. La partie intégrale est la somme d'erreur au fil du temps. Plus une erreur existe longtemps, plus la réaction à l'erreur est importante. La partie dérivative est le taux de changement de l'erreur. Si le taux de changement de l'erreur est élevé, l'effet sur le contrôle dérivatif est plus important. On le remarque tout particulièrement pendant le dépassement, lorsque le taux de changement de l'erreur accélère dans le mauvais sens, et réduit donc l'agressivité de la boucle.

### Exemple

Cible = 50 non calibré  
Gain proportionnel,  $K_p = 5$   
Gain intégral,  $K_i = 0,1$   
Gain dérivatif,  $K_d = 0$

@ Heure,  $t = 0$   
Actuel non calibré = 30

$$\begin{aligned}MV(t) &= 5(50-30) + 0,1(50-30) + 0(50-30) \\MV(t) &= 100 + 2 + 0 \\MV(t) &= 102\end{aligned}$$

>limite MV(t) donc sortie de contrôle (C.O) = 100

@t=1  
Actuel non calibré = 40

$$\begin{aligned}MV(t) &= 5(50-40) + 0,1(50-40) + 0,1(50-30) + 0(50-40) \\MV(t) &= 50 + 1 + 2 + 0 \\MV(t) &= 53 \\C.O &= 53\end{aligned}$$

@t=2  
Actuel non calibré = 45 (réduction de l'augmentation car C.O. est < 100 maintenant)

$$\begin{aligned}MV(t) &= 5(50-45) + 0,1(50-45) + 0,1(50-40) + 0,1(50-30) + 0(50-48) \\MV(t) &= 25 + 0,5 + 1 + 2 + 0 \\MV(t) &= 28,5 \\C.O &= 28,5\end{aligned}$$

@t=3  
Actuel non calibré = 50  
 $MV(t) = 5(50-50) + 0,1(50-50) + 0,1(50-45) + 1(50-40) + 0,1(50-30) + 0(50-50)$   
 $MV(t) = 0 + 0 + ,5 + 1 + 2 + 0$   
C.O = 3,5

*À ce stade, la cible a été atteinte et la valve peut être mise à l'arrêt. Si aucun gain intégral n'avait été utilisé, la valve aurait été fermée davantage au fur et à mesure que la valeur actuelle s'approchait de la cible, de manière à fortement ralentir l'augmentation. Ceci entraîne des temps d'ajout d'eau plus longs mais est moins susceptible de provoquer un dépassement. Dans les processus où l'on assiste à une réaction chimique avec l'eau pendant la période de malaxage, le gain intégral augmente l'agressivité de la boucle au fil du temps, ce qui élimine le décalage causé par la réaction chimique.*

Comme la plupart des systèmes de malaxage ne peuvent pas se permettre de dépasser les ajouts, il est nécessaire d'introduire une zone morte. Il s'agit généralement d'un décalage par rapport à la véritable cible pour empêcher le dépassement. Par exemple, si la cible était 5 % d'humidité, un décalage de 0,2 % pourrait être introduit pour arrêter le régulateur à 4,8 %. Ceci compense le



temps entre l'ajout d'eau et le temps qu'il faut pour que l'eau se mélange et soit mesurée par la sonde.

Dans le cas de systèmes qui ont uniquement des valves numériques plutôt que des valves proportionnelles, il est nécessaire d'imiter le mieux possible une valve proportionnelle. Vous trouverez une méthode simple pour y parvenir sur l'exemple ci-dessous

### Exemple

1. *Définissez une période cyclique, par exemple le temps nécessaire pour commuter une valve de la position arrêt à marche, puis à nouveau en position d'arrêt.*
2. *Définissez une période de contrôle, par exemple 5 périodes cycliques.*
3. *Après chaque période de contrôle, calculez  $MV(t)$ .*
4.  $80 < MV(t) \leq 100$  = la valve reste en position de marche pendant 5 périodes cycliques  
 $60 < MV(t) < 80$  = la valve reste en position de marche pendant 4 périodes cycliques, et en position d'arrêt pendant 1 période cyclique  
 $40 < MV(t) < 60$  = la valve reste en position de marche pendant 3 périodes cycliques, et en position d'arrêt pendant 2 périodes cycliques  
 $20 < MV(t) < 40$  = la valve reste en position de marche pendant 2 périodes cycliques, et en position d'arrêt pendant 3 périodes cycliques  
 $0 < MV(t) < 20$  = la valve reste en position de marche pendant 1 période cyclique, et en position d'arrêt pendant 4 périodes cycliques

Comme c'est le cas de tous les régulateurs PID, un certain degré d'expérimentation s'impose pour obtenir les valeurs qui permettent au système de malaxage d'atteindre une performance optimale.