



# Guide d'établissement d'un programme scientifique de contrôle de la qualité de la biomasse

Octobre 2018

Marian Marinescu, PhD

FPInnovations est un institut de recherche sans but lucratif, chef de file mondial qui se spécialise dans la création de solutions scientifiques pour soutenir la compétitivité du secteur forestier canadien à l'échelle internationale et qui répond aux besoins prioritaires de ses membres industriels et de ses partenaires gouvernementaux. Il bénéficie d'un positionnement idéal pour faire de la recherche, innover et livrer des solutions d'avant-garde qui touchent à tous les éléments de la chaîne de valeur forestière, des opérations forestières aux produits de consommation et industriels. L'organisation a des laboratoires de recherche à Québec, Montréal et Vancouver ainsi que des bureaux de transfert de technologie à travers le Canada. Pour plus d'information sur FPInnovations : [www.fpinnovations.ca](http://www.fpinnovations.ca).

Suivez-nous sur :



## Résumé

Pour soutenir la mise en place de pratiques d'approvisionnement en biomasse, un programme scientifique structuré, rigoureux et uniforme de contrôle de la qualité (CQ) est nécessaire. Ce programme doit servir à déterminer les besoins des clients, les sources de variation du produit et les façons d'éliminer ou de minimiser cette variation dès qu'elle se manifeste. Il doit aussi comprendre un plan de CQ et un protocole d'échantillonnage bien conçus, des méthodes et outils de contrôle statistique des processus, des équipes officielles de CQ et une formation régulière.

Le présent rapport décrit divers outils statistiques de CQ et en fait la démonstration à l'aide d'exemples de données sur le taux d'humidité de la biomasse. Ces outils peuvent être développés à l'interne ou achetés, mais il est recommandé de les intégrer aux bases de données actuelles (p. ex., LIMS). Les experts de FPInnovations peuvent aider à établir un programme de CQ adapté à une entreprise ou à un produit de biomasse et former les équipes de CQ en vue du développement et de l'utilisation des outils présentés ici.

## Remerciements

Le guide utilise des renseignements tirés du cours Wood 335 – Quality Improvement, préparé par le regretté professeur Thomas C. Maness. Marian Marinescu a donné ce cours en 2004 à la Faculté de foresterie de l'Université de la Colombie-Britannique à Vancouver.

L'auteur aimerait remercier les collaborateurs du Centre d'innovation de la Nouvelle-Écosse pour leur appui.

## Réviseur

Ken Byrne  
Gestionnaire, Approvisionnement en fibre

## Contact

Marian Marinescu  
Chercheur principal, Prise de décision avancée  
604-222-5609  
[marian.marinescu@fpinnovations.ca](mailto:marian.marinescu@fpinnovations.ca)

Table des matières

Introduction..... 5

Programme structuré de CQ de la biomasse..... 5

Plan structuré de CQ ..... 5

Protocole d'échantillonnage de la biomasse ..... 5

Outils statistiques de CQ..... 8

Organigrammes..... 8

Histogrammes ..... 9

Diagrammes de Pareto ..... 11

Diagrammes de dispersion (à nuage de points)..... 12

Diagrammes de progression ..... 14

Cartes de contrôle ..... 16

Cartes radar..... 22

Sommaire des outils statistiques de CQ de la biomasse..... 25

Outils commerciaux de CQ ..... 25

Conclusions et recommandations ..... 25

Références ..... 26

Annexe ..... 27

Liste des figures

Figure 1. Organigramme de la procédure d'échantillonnage à l'arrivée de camions de biomasse..... 9

Figure 2. Histogramme des mesures du taux d'humidité à l'arrivée de chargements de camion de copeaux de bois..... 10

Figure 3. Histogramme des mesures du taux d'humidité à l'arrivée de chargements de camion d'écorce..... 10

Figure 4. Diagramme de Pareto des mesures du taux d'humidité à l'arrivée de chargements de copeaux de bois..... 11

Figure 5. Diagramme de Pareto des mesures du taux d'humidité à l'arrivée de chargements d'écorce..... 12

Figure 6. Diagramme de dispersion des mesures du taux d'humidité à l'arrivée de chargements de copeaux de bois..... 13

Figure 7. Diagramme de dispersion des mesures du taux d'humidité à l'arrivée de chargements d'écorce..... 14

Figure 8. Diagramme de progression des mesures du taux d'humidité à l'arrivée de chargements de copeaux de bois..... 15

Figure 9. Diagramme de progression des mesures du taux d'humidité à l'arrivée de chargements d'écorce..... 16

Figure 10. Causes de variation des attributs de qualité..... 17

Figure 11. Carte X-barre des mesures du taux d'humidité à l'arrivée de chargements de copeaux de bois..... 19

Figure 12. Carte X-barre des mesures du taux d'humidité à l'arrivée de chargements d'écorce. .... 19

Figure 13. Carte S des mesures du taux d'humidité à l'arrivée de chargements de copeaux de bois... 21

Figure 14. Carte S des mesures du taux d'humidité à l'arrivée de chargements d'écorce..... 21

Figure 15. Carte X-barre de la biomasse sortante (vers la chaudière) ..... 22

Figure 16. Carte radar des valeurs du taux d'humidité mensuel moyen par fournisseur..... 23

Figure 17. Cartes radar des attributs de performance par fournisseur ..... 24

Liste des tableaux

Tableau 1. Sommaire des outils de CQ ..... 25

Tableau 2. Outils commerciaux de CQ ..... 25

## Introduction

Pour soutenir la mise en place de pratiques d'approvisionnement en biomasse, un programme scientifique structuré, rigoureux et uniforme de contrôle de la qualité (CQ) est nécessaire. En général, dans un secteur industriel quelconque, on utilise deux types de programmes de CQ : non structuré et structuré. Un programme non structuré de CQ se base généralement sur un simple protocole d'échantillonnage et sur une méthodologie conçue pour appuyer un système de paiement existant (p. ex., par tonne anhydre), dans le seul but de *résoudre les plaintes des clients*. Par contre, un programme structuré de CQ est conçu pour déterminer les besoins des clients, les sources de variation du produit et les façons d'éliminer ou de minimiser cette variation dès qu'elle se manifeste dans la chaîne d'approvisionnement, pour *éviter les plaintes des clients*.

## Programme structuré de CQ de la biomasse

Contrairement à un programme non structuré de CQ, qui vise la connaissance de la qualité par des vérifications ponctuelles, par une formation non structurée et par des réunions d'équipe régulières, un programme de CQ structuré exige un plan et un protocole d'échantillonnage bien conçus, des méthodes et outils de contrôle statistique des processus, des équipes d'amélioration de la qualité et des séances de formation à intervalles réguliers.

### Plan structuré de CQ

Les étapes suivantes sont nécessaires pour concevoir et mettre en œuvre un plan structuré de CQ :

1. Comprendre les besoins des clients (p. ex., type de biomasse, attributs de qualité, échéancier, caractère saisonnier).
2. Comprendre où sont les sources de variabilité du produit (p. ex., réception, manipulation, entreposage, traitement, livraison de la biomasse).
3. Recueillir des échantillons à des points clés du cheminement de la biomasse (p. ex., biomasse entrante/sortante, entreposage).
4. Appliquer des méthodologies de contrôle statistique des processus (c.-à-d., faire des graphiques et analyser les statistiques des processus).
5. Mettre en œuvre un plan de rétroaction pour les clients.
6. Élaborer et diffuser un plan de CQ écrit.
7. Concevoir et mettre en œuvre un programme rigoureux de formation au CQ.
8. Élaborer et mettre en application des pratiques de gestion menant à l'amélioration continue.

### Protocole d'échantillonnage de la biomasse

#### Pourquoi recueillir des données?

Dans un programme non structuré de CQ, les données sont généralement recueillies pour deux raisons : réagir à une crise et/ou attribuer le blâme. Ces deux objectifs nuisent à la confiance en soi, à la sécurité, au moral et à la productivité du personnel et mèneront rapidement à une entreprise ou un milieu de travail dirigé par la peur et le manque de confiance.

Dans un programme structuré de CQ, les données sont recueillies uniquement pour comprendre la variation des produits et la réduire le plus possible. Un programme structuré de CQ vise essentiellement l'apprentissage, la compréhension et la collaboration (p. ex., entre client et fournisseur)

et le résultat est une entreprise ou un milieu de travail où la confiance règne et où les employés qui travaillent au programme de CQ deviennent des experts.

### **Étapes pour établir un protocole d'échantillonnage fiable**

#### **1. Déterminer les données nécessaires**

Ce sont généralement les connaissances d'experts qui déterminent les données requises. Les entrevues et la collaboration avec les clients sont les méthodes les plus évidentes pour établir les attributs de qualité exigés par les clients (p. ex., le taux d'humidité, le pourcentage de particules fines, le pourcentage de particules surdimensionnées, etc.). Pour déterminer les attributs de qualité moins évidents (p. ex., la valeur calorifique, la teneur en composés organiques volatils, etc.), des séances de résolution de problèmes peuvent être organisées avec tous les fournisseurs et utilisateurs de biomasse.

#### **2. Déterminer les sources de données**

Aujourd'hui plus que jamais, grâce aux progrès technologiques, de grandes quantités de données sont recueillies automatiquement (p. ex., par des capteurs, des scanners, des systèmes d'inventaire, des caméras, etc.). Malheureusement, beaucoup de ces données précieuses ne sont pas analysées ni utilisées. Par exemple, on pourrait installer un scanner à l'entrée de la biomasse dans une chaudière pour contrôler la vitesse du convoyeur d'alimentation selon le taux d'humidité de la biomasse entrante. Cette information pourrait aussi servir à générer des cartes de contrôle pour le CQ, qui pourraient être transmises aux fournisseurs de biomasse afin de réduire la variation du taux d'humidité et donc d'améliorer l'efficacité de la chaudière.

Aujourd'hui, bien des fournisseurs et utilisateurs de biomasse utilisent des bases de données, comme un système de gestion et d'inventaire des billes (LIMS),<sup>1</sup> dans lesquels les données (c.-à-d., volume, taux d'humidité, taille des particules, etc.) sur leurs produits de biomasse sont stockées. Malheureusement, ces données servent rarement et le font la plupart du temps à la fin d'une période d'inventaire (p. ex., mois, trimestre ou année) ou lors d'une crise (p. ex., une hausse marquée du taux d'humidité de la biomasse à la chaudière). Or, l'analyse de ces données avec des outils de CQ dans les opérations quotidiennes pourrait éviter ou prévoir les épisodes extrêmes.

Il est essentiel de choisir la taille des échantillons pour chaque processus ou fournisseur, le nombre de répétitions d'échantillons nécessaires, l'endroit où il faut prélever les échantillons, la façon de les obtenir et de les entreposer et les informations à enregistrer sur les sacs ou réceptacles des échantillons. Il est fortement recommandé de suivre des protocoles d'échantillonnage conçus de façon rigoureuse, comme ceux que décritvent Marinescu, Volpé, Desrochers et Rösler (2015). Toute l'information doit être enregistrée dans un formulaire bien conçu.

#### **3. Créer un formulaire d'entrée de données**

---

<sup>1</sup> LIMS est une plateforme de comptabilisation développée par l'entreprise canadienne 3LOG Systems Inc., de Vancouver, qui a été installée plus de 500 fois au Canada. La plateforme sert à l'industrie forestière comme système d'approvisionnement en fibre, qui fait le suivi du taux d'humidité, des contaminants et d'autres attributs de qualité de la biomasse dans toute la chaîne d'approvisionnement.

Aujourd'hui, la plupart des formulaires d'entrée de données sont conçus en format électronique ou sous forme d'application et les données sont sauvegardées directement dans une base de données intégrée à l'échelle de l'entreprise. Les formulaires doivent être faciles à utiliser, clairs et dotés d'instructions sur comment et où entrer les données.

#### *4. Recueillir les données*

La collecte de données doit se baser sur des protocoles d'échantillonnage clairs, bien établis et bien rédigés. Le personnel doit être formé périodiquement. Des vérifications ponctuelles doivent être faites pour s'assurer que le protocole est suivi et devient partie intégrante de la culture de CQ. Par exemple, si ce sont les conducteurs de camion qui échantillonnent la biomasse, des vérifications ponctuelles doivent être faites au hasard à différents moments de la journée pour s'assurer qu'ils suivent les protocoles. On peut utiliser des caméras vidéo aux stations de déchargement de la biomasse pour surveiller la façon de faire l'échantillonnage. En cas d'écart par rapport aux protocoles d'échantillonnage, il faut y voir par une mesure corrective et une amélioration du protocole d'échantillonnage. L'idée, c'est que la culture de la CQ devienne aussi naturelle que la culture de la sécurité, car les deux sont liées. Les protocoles d'échantillonnage doivent faire en sorte que le prélèvement d'échantillons dans les chargements se fasse de façon sécuritaire; il existe aujourd'hui des technologies automatisées d'échantillonnage à utiliser. Par exemple, il faut autant que possible avoir recours aux caméras en ligne, scanneurs et capteurs. Lorsque des échantillons de biomasse sont prélevés dans une pile ou un chargement de camion, un système de godets automatisés devrait être utilisé pour que la personne qui prélève l'échantillon ne soit exposée à aucun danger.

Pour une description plus détaillée d'un protocole d'échantillonnage et de la collecte de données, consulter Marinescu, Volpé, Desrochers et Röser (2015).

#### **Exemple de plan de collecte de données**

Voici certains des éléments du CQ à considérer lors de l'élaboration d'un plan de collecte de données :

##### *Attributs de qualité*

- Taux d'humidité (% base humide)
- Particules surdimensionnées (% en poids)
- Particules fines (% en poids)
- Contamination (% en poids)

##### *Lieux d'échantillonnage*

- Stations de déchargement, à partir du flot de biomasse (idéal, mais un système d'échantillonnage automatique est recommandé) et/ou par une fenêtre latérale de la remorque (moins précis)
- Convoyeurs d'alimentation de la chaudière (système d'échantillonnage automatique recommandé)
- Chaque pile (creuser dans les piles est difficile sur une base continue sans que l'échantillonnage détruise/perturbe les piles)

##### *Produits de biomasse échantillonnés*

- Écorce

- Copeaux de bois blanc

#### *Fournisseurs de biomasse échantillonnés*

- Contrôler tous les attributs de qualité pour chaque fournisseur
- Veiller à ce que les échantillons de tous les fournisseurs soient collectés à la même fréquence (p. ex., à chaque chargement)
- Avec le temps, les fournisseurs qui livrent constamment des produits de bonne qualité (c.-à-d., qui présentent des valeurs qui demeurent dans les limites de contrôle de l'attribut contrôlé) peuvent être échantillonnés moins souvent. Ainsi, la fréquence d'échantillonnage dépend de la qualité du produit livré par le fournisseur.

Pour les protocoles d'échantillonnage de la biomasse, consulter Marinescu, Volpé, Desrochers et Röser (2015).

## **Outils statistiques de CQ**

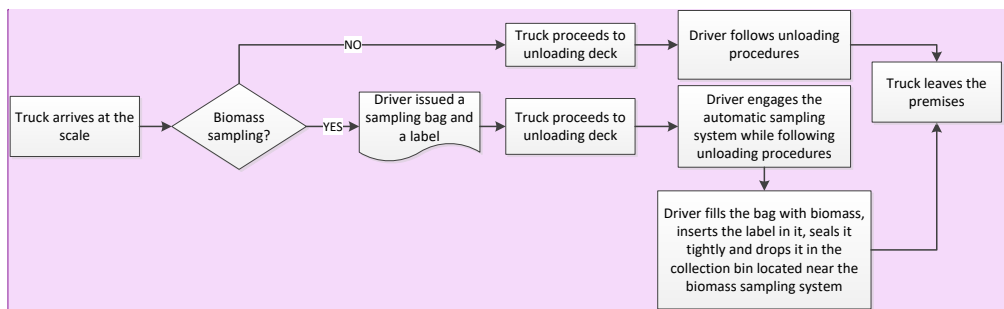
On peut utiliser les outils suivants pour comprendre, améliorer et contrôler la variation des attributs de qualité de la biomasse. Les fournisseurs ou utilisateurs de biomasse peuvent concevoir leurs propres outils selon l'information présentée ci-dessous, ou acheter des outils commerciaux (des exemples sont donnés à la fin du rapport).

### **Organigrammes**

Avant de tenter d'améliorer la qualité d'un processus ou d'un produit, il faut bien le comprendre. Les organigrammes sont utiles comme représentation visuelle de la séquence des processus, du matériel et/ou de l'information. On sait que le seul fait de créer ou de tracer l'organigramme d'un processus en améliore notre compréhension. Les organigrammes sont également des outils de communication utiles entre les employés d'une même organisation (p. ex., personnel du CQ, de la production et de la direction) ou entre différentes organisations (p. ex., client et fournisseur). Les organigrammes permettent d'éliminer les activités inutiles ou de combiner, simplifier et réorganiser les activités. Un bon organigramme répond aux questions suivantes : où a lieu le processus? Comment fonctionne le processus? Quel est son objectif? Qui est responsable de chaque étape? Quelle est la séquence chronologique du processus?

La Figure 1 est un exemple d'organigramme pour le processus d'échantillonnage de la biomasse à l'arrivée de camions.





**Figure 1. Organigramme de la procédure d'échantillonnage à l'arrivée de camions de biomasse.**

## Histogrammes

Les histogrammes sont des graphiques à barres qui représentent des dénombrements utiles d'attributs de qualité, de produits défectueux ou d'intervalles de mesures. On peut facilement générer des histogrammes dans Excel à l'aide d'un élément de l'utilitaire Analysis ToolPak appelé histogramme.

Les histogrammes communiquent des renseignements utiles sur :

- **La tendance centrale d'une distribution de mesures**, définie par la moyenne et la médiane des mesures. Par exemple, la Figure 2 montre que les copeaux de bois livrés pendant une période d'un mois par un fournisseur hypothétique avaient un taux d'humidité moyen d'environ 45 % (base humide), alors que le taux d'humidité moyen de l'écorce (Figure 3) livrée au cours du même mois par le même fournisseur était d'environ 65 % (base humide). Ainsi, si un client (p. ex., une centrale à biomasse) qui achète des copeaux et de l'écorce a besoin d'un taux d'humidité mensuel moyen de 55 % (base humide) pour ces deux produits, les histogrammes lui montreraient que le taux d'humidité cible pour les chargements entrants d'écorce n'est pas atteint pendant ce mois.
- **La répartition des données**, définie par la variance et l'écart type des mesures. La Figure 2 et la Figure 3 indiquent que les distributions du taux d'humidité des copeaux et de l'écorce s'étendent sur un vaste intervalle (entre 25 % et 80 %). Ainsi, si la politique d'acceptation du client exige que le taux d'humidité moyen de tous les chargements soit inférieur à 60 %, 6 chargements de copeaux de bois et 46 chargements d'écorce auraient dû être rejetés pendant ce mois. C'est là l'un des principaux inconvénients des histogrammes : ils ne révèlent les chargements défectueux qu'une fois qu'ils se sont produits.
- **La forme des données**, définie par la fonction de distribution. La Figure 2 montre que les valeurs du taux d'humidité des copeaux de bois étaient distribuées plus ou moins normalement, alors que la Figure 3 montre que celles de l'écorce avaient une distribution décalée vers la zone plus humide (c.-à-d., un taux d'humidité moyen élevé). La forme de ces histogrammes fait comprendre que les chargements d'écorce contenaient une forte proportion de biomasse humide, alors que les chargements de copeaux de bois contenaient une distribution plus uniforme de biomasse humide et sèche.

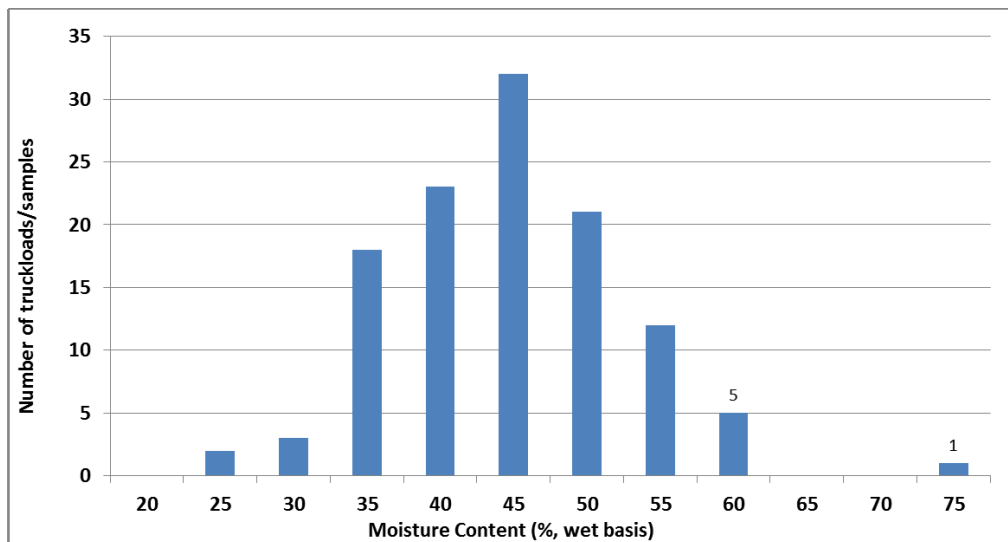


Figure 2. Histogramme des mesures du taux d'humidité à l'arrivée de chargements de camion de copeaux de bois.

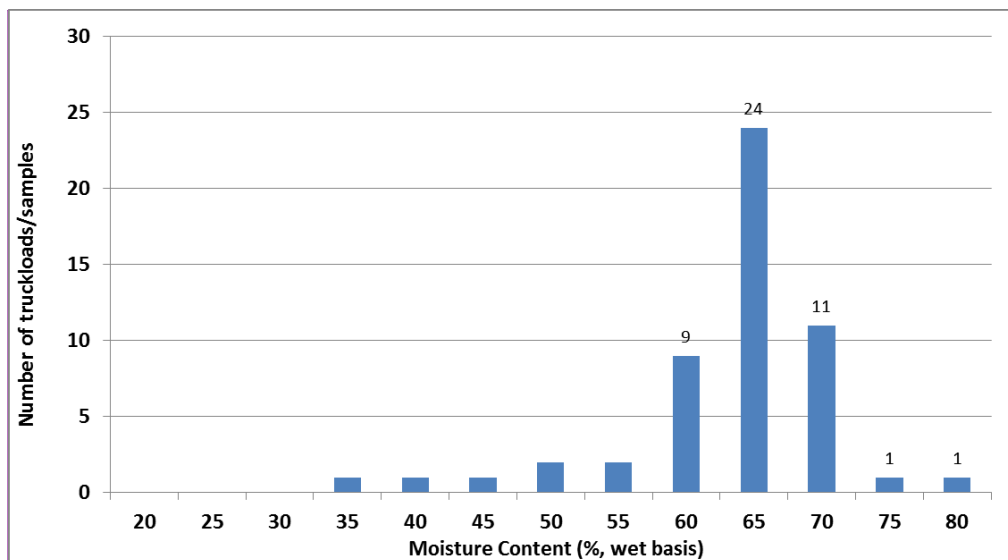


Figure 3. Histogramme des mesures du taux d'humidité à l'arrivée de chargements de camion d'écorce.

## Diagrammes de Pareto

Les diagrammes de Pareto sont des histogrammes organisés selon la fréquence des attributs de qualité. Ces diagrammes peuvent déterminer précisément les attributs de qualité ou les processus les plus problématiques. De plus, un graphique cumulatif aide à interpréter et à appliquer la règle des 80/20 : on peut obtenir 80 % des avantages en corrigeant 20 % des problèmes. On peut facilement créer des diagrammes de Pareto dans Excel en utilisant la fonction histogramme de l'utilitaire Analysis ToolPak et en cochant la case Pareto.

La Figure 4 et la Figure 5 montrent respectivement des diagrammes de Pareto illustrant des chargements de camion de copeaux et d'écorce échantillonnés au cours d'un mois. La Figure 4 montre que 80 % des chargements de copeaux présentaient un taux d'humidité entre 35 % et 50 %, alors que la Figure 5 indique que le taux d'humidité de 80 % des chargements d'écorce s'établissait entre 60 % et 70 %. Ces données laissent croire que ce fournisseur n'aurait pas respecté la cible du client, soit un taux d'humidité maximal de 60 % dans chaque chargement, et que des mesures correctives auraient été nécessaires.

Les diagrammes de Pareto fournissent d'importantes informations, en particulier lorsqu'ils concernent des mesures de dimensions ou des procédés de conversion de la biomasse, comme le déchiquetage ou le broyage, le séchage, etc., auxquels cas ils révèlent les causes les plus importantes de faible qualité du produit ou l'étape où se produit le problème.

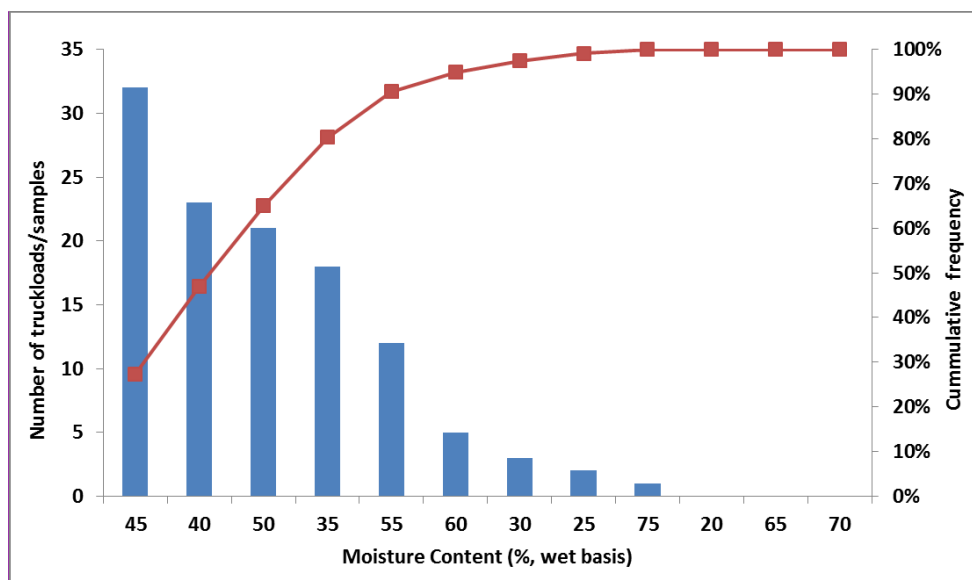
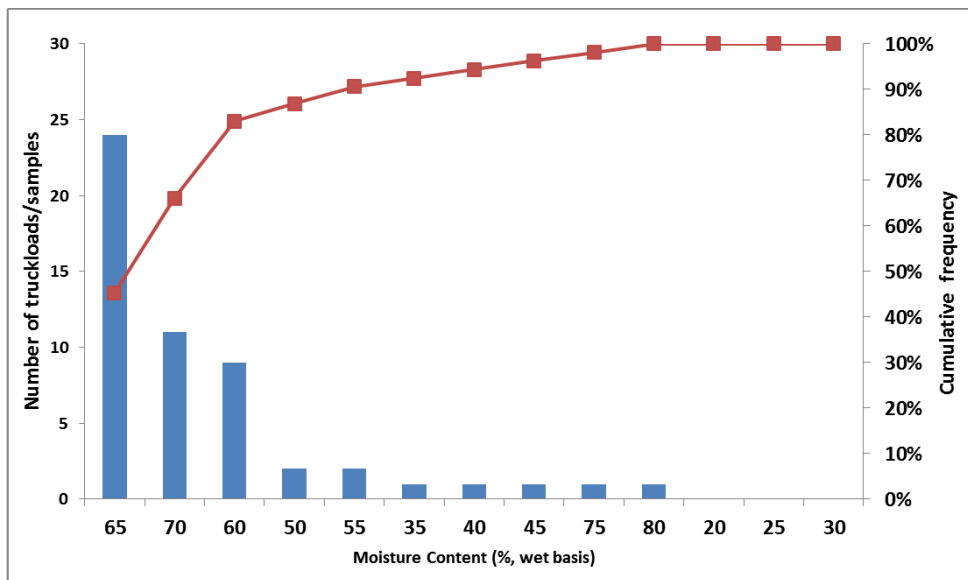


Figure 4. Diagramme de Pareto des mesures du taux d'humidité à l'arrivée de chargements de copeaux de bois.

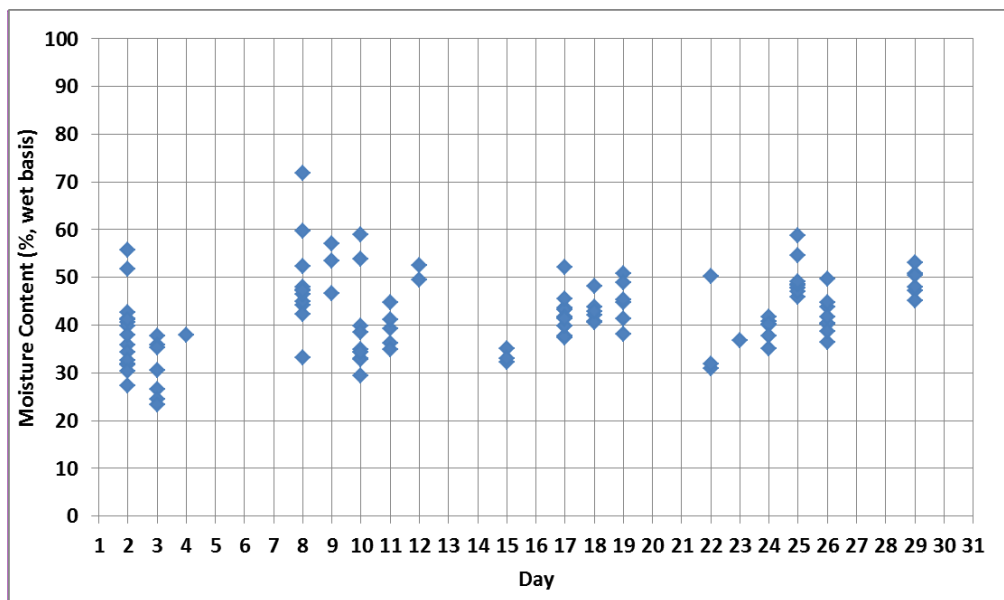


**Figure 5. Diagramme de Pareto des mesures du taux d'humidité à l'arrivée de chargements d'écorce.**

### Diagrammes de dispersion (à nuage de points)

Les diagrammes de dispersion sont des graphiques où toutes les données sont placées sur un axe à deux dimensions; ils sont utiles pour observer si et comment une variable est liée à une autre. Par exemple, les diagrammes de dispersion peuvent servir à constater comment la taille des copeaux varie avec le nombre d'heures de fonctionnement de la déchiqueteuse, afin de contrôler la qualité des copeaux et de déterminer si l'équipement de déchiquetage a subi de l'usure ou de la détérioration. Ces diagrammes servent moins souvent à représenter la variation de données dans le temps, mais même dans ce cas, ils permettent de déterminer le jour ou l'heure où les attributs de qualité varient le plus, le moment où des valeurs aberrantes sont enregistrées ou s'il y a des tendances saisonnières ou des variations extrêmes. Les diagrammes de dispersion se créent facilement dans Excel à l'aide de la fonction Nuage de points.

La Figure 6 montre qu'il n'existe pas de variation saisonnière visible du taux d'humidité entre les chargements de copeaux reçus au fil du mois. Cependant, les chargements reçus les jours 2 et 8 présentaient des valeurs de taux d'humidité plus dispersées, ce qui peut nécessiter un examen plus poussé. De même, il n'y a pas de variation saisonnière pendant ce mois entre les chargements d'écorce (Figure 7) de ce fournisseur. Toutefois, les valeurs aberrantes du taux d'humidité des chargements d'écorce reçus les jours 3 et 23 semblent trop faibles par rapport aux autres valeurs et pourraient mettre en cause une mauvaise analyse des échantillons de ces deux journées.



**Figure 6. Diagramme de dispersion des mesures du taux d'humidité à l'arrivée de chargements de copeaux de bois.**

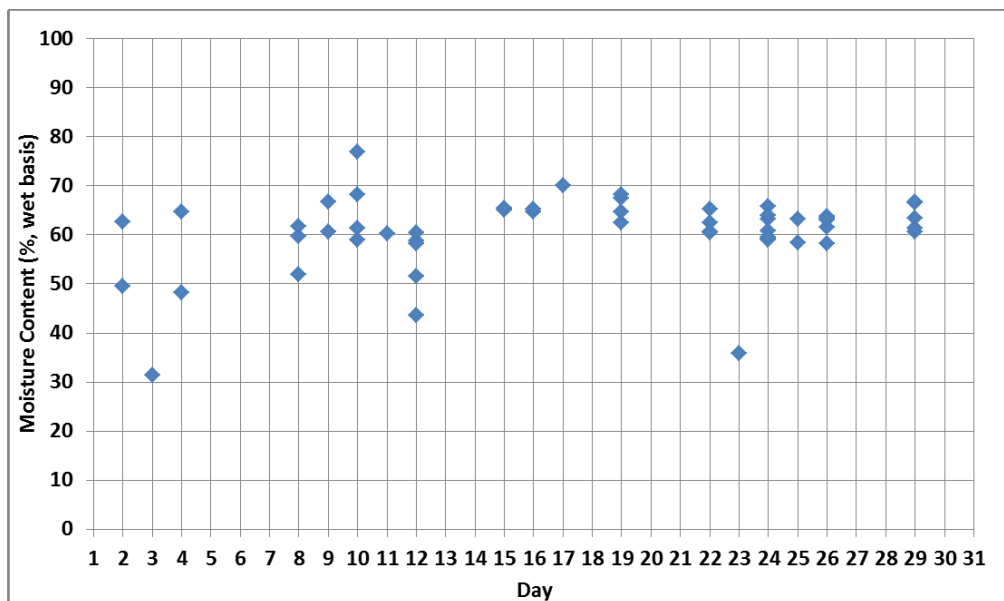
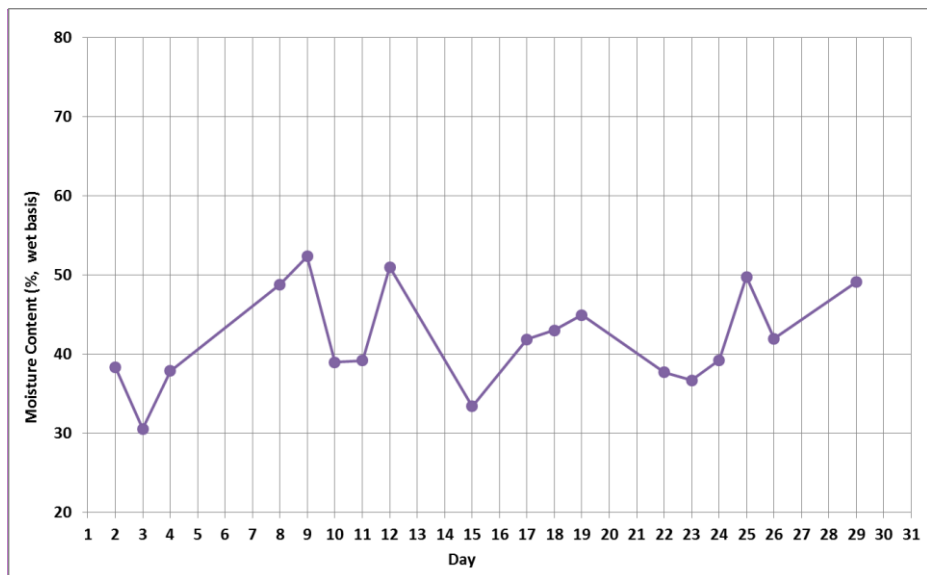


Figure 7. Diagramme de dispersion des mesures du taux d'humidité à l'arrivée de chargements d'écorce.

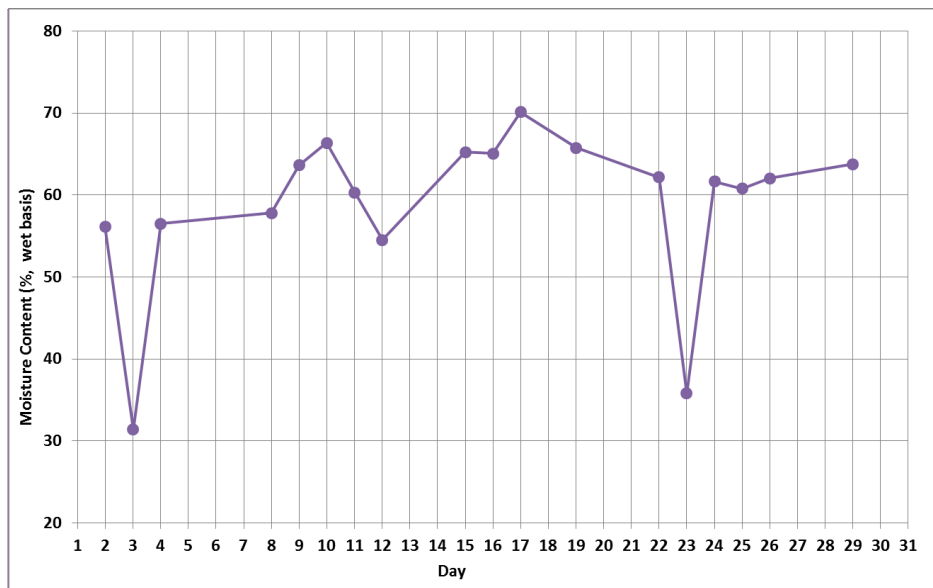
### Diagrammes de progression

Les diagrammes de progression sont similaires aux diagrammes de dispersion, mais ils indiquent comment les valeurs moyennes des attributs de qualité varient dans le temps. Ces diagrammes peuvent illustrer certaines tendances, des variations saisonnières, des données aberrantes, etc.

La Figure 8 et la Figure 9 illustrent des diagrammes de progression des moyennes quotidiennes du taux d'humidité des mesures représentées à la Figure 6 et à la Figure 7, respectivement; ils confirment les conclusions tirées de l'observation des diagrammes de dispersion. Bien que les diagrammes de progression soient utiles pour souligner les tendances et les valeurs aberrantes, ils n'indiquent pas si la variation des attributs de qualité est anormalement forte ou faible (c.-à-d., si elle est hors de contrôle ou en dehors des spécifications). Par exemple, le diagramme de la Figure 9 n'indique pas si le taux d'humidité moyen des chargements d'écorce livrés le jour 17 (70 %) est anormalement élevé ou s'il se trouve dans la variation normale du taux d'humidité mensuel. Pour déterminer si une valeur moyenne est hors de contrôle, il faut plutôt utiliser une carte de contrôle.



**Figure 8. Diagramme de progression des mesures du taux d'humidité à l'arrivée de chargements de copeaux de bois.**



**Figure 9. Diagramme de progression des mesures du taux d'humidité à l'arrivée de chargements d'écorce.**

### Cartes de contrôle

Les cartes de contrôle sont des diagrammes de progression basés sur des analyses statistiques de moyennes et de variances. Les cartes de contrôle comportent un axe central (AC), une limite supérieure de contrôle (LSC) et une limite inférieure de contrôle (LIC), qui indiquent quand la valeur moyenne d'un attribut de qualité est hors de contrôle. Il existe deux causes de variation de la qualité : aléatoire et spéciale (Figure 10). La variation aléatoire (ou la variation naturelle courante) est toujours présente dans un produit, alors que la variation spéciale est causée par un événement imprévu et doit être diagnostiquée et corrigée. Un processus est considéré comme « sous contrôle » lorsque seule la variation aléatoire est présente; en d'autres termes, lorsque les moyennes tracées se situent entre la LSC et la LIC.



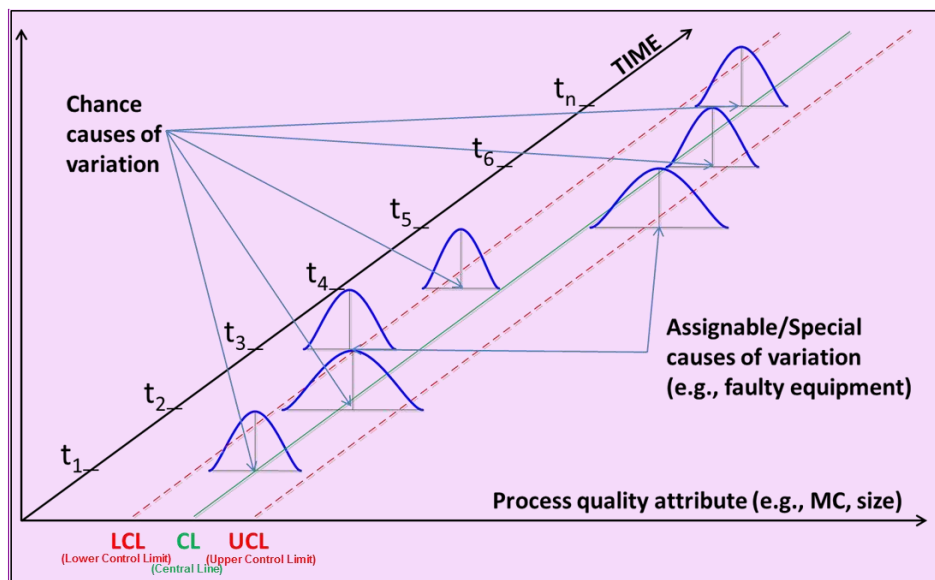


Figure 10. Causes de variation des attributs de qualité. (TH = taux d'humidité)

Il existe deux types courants de cartes de contrôle qu'on doit utiliser ensemble pour surveiller et contrôler un processus :

- Cartes X-barre – pour contrôler les moyennes des processus
- Cartes S – pour contrôler la variation des processus (c.-à-d., l'écart type)

### Cartes X-barre

Les cartes X-barre font le suivi de diverses moyennes (p. ex., le taux d'humidité, le pourcentage de particules fines, le pourcentage de particules surdimensionnées, le pourcentage de contamination) sur certaines périodes de temps (p. ex., heures, jours, semaines, mois). Ces cartes se basent sur la probabilité statistique voulant que 99,73 % des valeurs moyennes soient à l'intérieur de  $\pm 3$  erreurs types de la moyenne à partir de la moyenne globale. Ainsi, les limites de contrôle des cartes X-barre sont établies à  $\pm 3$  erreurs types de la moyenne à partir de l'axe central (la valeur de la moyenne globale). En d'autres termes, si un processus est sous contrôle, la moyenne de chaque échantillon a 99,73 % de chance de se situer dans les limites de contrôle de la carte X-barre. Une carte X-barre indique la moyenne du processus sur l'axe des y, le nombre d'échantillons ou le temps d'échantillonnage sur l'axe des x, un axe central (moyenne globale, ou valeur cible), une LSC et une LIC. Parfois, comme dans le cas du taux d'humidité moyen de la biomasse (lorsqu'on souhaite une biomasse plus sèche), la LIC peut être ignorée. Les formules suivantes sont couramment utilisées pour construire une carte X-barre :

$$AC = \bar{\bar{X}}$$

$$LSC = \bar{\bar{X}} + A_3\bar{S}$$

$$LIC = \bar{\bar{X}} - A_3\bar{S}$$

Où :

$\bar{\bar{X}}$  est la moyenne globale (moyenne de toutes les moyennes des échantillons).

$\bar{S}$  est l'écart type moyen (la moyenne des écarts types de tous les échantillons).

$A_3$  est un facteur de la carte X-barre (voir l'annexe), qui, appliqué à  $\bar{S}$ , est très proche de 3 erreurs type de la moyenne. Le facteur de la carte dépend de la taille de l'échantillon,  $n$ , qui est le nombre de mesures utilisées pour calculer la moyenne de chaque échantillon.

La taille de l'échantillon  $n$  a une influence sur l'aspect des lignes des LSC et LIC. On aura soit des lignes continues, lorsque la taille de l'échantillon  $n$  est la même pour tous les échantillons, ou des lignes décalées, lorsque la taille de l'échantillon  $n$  est différente pour chaque échantillon. Idéalement,  $n$  devrait être la même pour tous les échantillons. Cependant, ce peut être impossible en pratique (par exemple, lorsque le nombre quotidien de chargements de camion entrants varie).

La Figure 11 montre que les chargements de camion de copeaux quotidiens entrants pendant un mois présentaient un taux d'humidité plus faible que celui des chargements d'écorce (Figure 12); toutefois, on remarque pour les chargements de copeaux 4 valeurs moyennes du taux d'humidité hors de contrôle (jours 8, 9, 25 et 29), contrairement à un seul pour les chargements d'écorce (jour 10). Idéalement, lorsqu'un plan rigoureux de CQ est appliqué, il faut tenir un dossier des causes spéciales expliquant les valeurs hors de contrôle pour que le problème soit éliminé et le processus ramené sous contrôle. Remarquez les lignes de LSC décalées, qui indiquent des tailles d'échantillon variables au cours de ce mois.

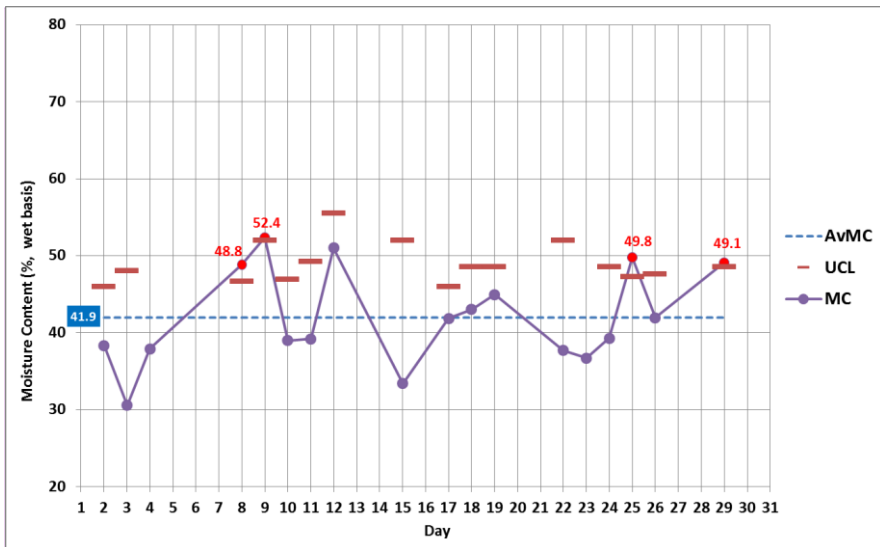


Figure 11. Carte X-barre des mesures du taux d'humidité à l'arrivée de chargements de copeaux de bois. (THmoy, taux d'humidité moyen; TH, taux d'humidité; LSC, limite supérieure de contrôle)

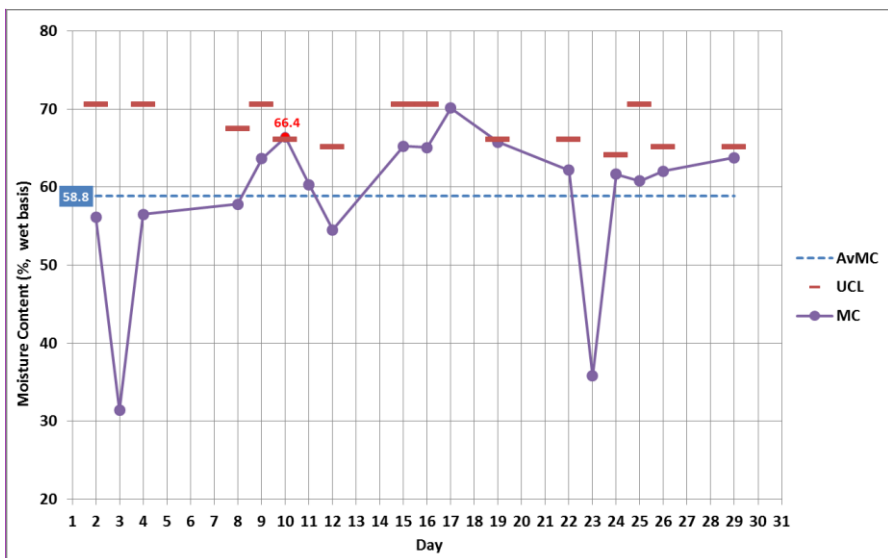


Figure 12. Carte X-barre des mesures du taux d'humidité à l'arrivée de chargements d'écorce. (THmoy, taux d'humidité moyen; TH, taux d'humidité; LSC, limite supérieure de contrôle)

**Cartes S**

Les cartes S sont complémentaires aux cartes X-barre; elles suivent et contrôlent la variation (c.-à-d., l'écart type) entre les échantillons (p. ex., les chargements) pendant les mêmes périodes de temps que les cartes X-barre. Généralement, peu importe l'attribut de qualité mesuré, les cartes S ont seulement une LSC, parce qu'une variation plus faible est toujours souhaitable. Il n'est pas rare de voir des cartes X-barre dont les moyennes sont à l'intérieur des limites de contrôle (c.-à-d., que le processus est sous contrôle), alors que dans les cartes S, les valeurs de l'écart type sont à l'extérieur des limites de contrôle. Les formules suivantes servent à construire une carte S :

$$AC = \bar{S}$$

$$LSC = B_4\bar{S}$$

$$LIC = B_3\bar{S}$$

Où :

$\bar{S}$  est l'écart type moyen (la moyenne des écarts types de tous les échantillons).

$B_3$  et  $B_4$  sont les facteurs de la carte **S** (voir l'annexe). Comme pour les cartes X-barre, la valeur de ces facteurs dépend de la taille de l'échantillon  $n$ , qui détermine si les lignes des LSC et LIC sont continues ou décalées.

La Figure 13 et la Figure 14 montrent des cartes S pour les valeurs du taux d'humidité des copeaux de bois et de l'écorce respectivement au cours d'un mois. La Figure 13 indique qu'il y avait deux valeurs hors de contrôle (jours 8 et 10) dues à la forte variation du taux d'humidité entre les chargements de copeaux reçus lors de ces deux jours. Aucune valeur hors de contrôle n'a été enregistrée pour les chargements d'écorce. L'analyse des figures 11 à 14 suscite les observations suivantes :

- Le taux d'humidité moyenne de l'échantillon de copeaux prélevé le jour 10 était sous contrôle dans la carte X-barre, mais hors de contrôle dans la carte S. Cette situation indique un problème potentiel de variation du taux d'humidité des chargements de copeaux reçus ce jour-là; par exemple, les chargements provenaient de différentes sources, ou des événements spéciaux ont provoqué l'augmentation du taux d'humidité pour journée particulière (pluie, neige, etc.). Les causes de la variation doivent être enregistrées et, si possible, éliminées.
- La variation du taux d'humidité dans les chargements d'écorce a diminué considérablement au jour 15 et est demeurée plutôt faible le reste du mois. C'est une situation souhaitable et les raisons qui l'expliquent doivent être étudiées et potentiellement utilisées comme saines pratiques.

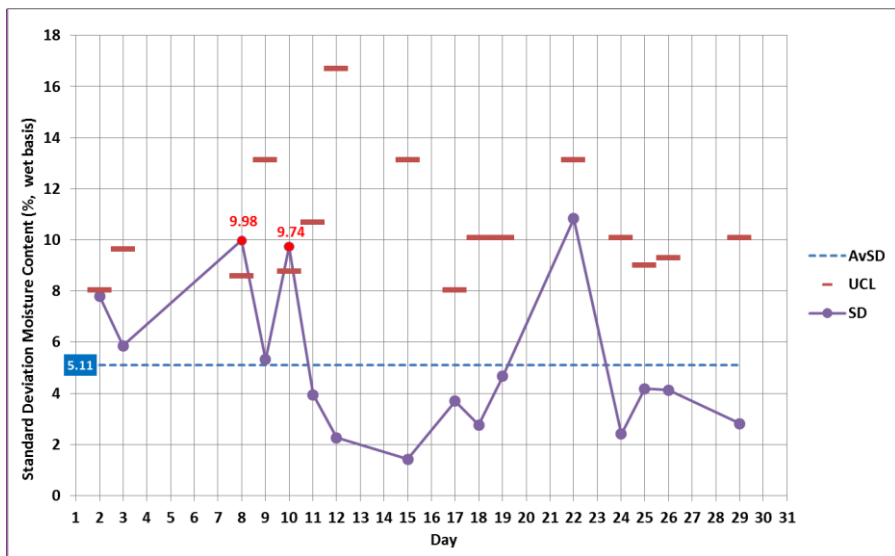


Figure 13. Carte S des mesures du taux d'humidité à l'arrivée de chargements de copeaux de bois. (ÉTmoy, écart type moyen; ÉT, écart type; LSC, limite supérieure de contrôle)

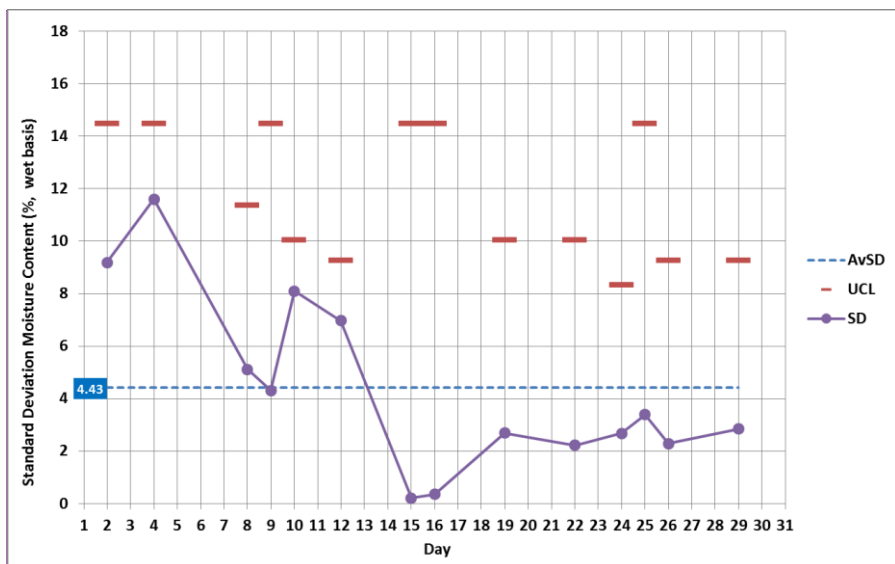


Figure 14. S Carte S des mesures du taux d'humidité à l'arrivée de chargements d'écorce. (ÉTmoy, écart type moyen; ÉT, écart type; LSC, limite supérieure de contrôle)

Les cartes X-barre et S sont aussi recommandées pour le suivi et le contrôle des attributs de qualité de la biomasse sortante. La Figure 15 présente une carte X-barre des moyennes hebdomadaires du taux d'humidité de la biomasse introduite dans une chaudière. Il est à noter que comme la taille des échantillons était plutôt similaire chaque semaine, les LSC forment presque une ligne pleine. On remarque aussi le grand nombre de valeurs de taux d'humidité moyen qui sont hors de contrôle, principalement à cause de différences saisonnières (hiver versus été). Ainsi, il faut faire un ajustement aux limites de contrôle des mois d'été pour refléter ces différences (c.-à-d., réduire la LSC pendant l'été). Comme la biomasse chargée dans la chaudière est mélangée à l'avance pour garantir un taux d'humidité assez uniforme, il est recommandé de générer des cartes X-barre et S sur une base quotidienne plutôt qu'hebdomadaire pour obtenir des indications précieuses sur la façon de contrôler et d'améliorer le processus de mélange.

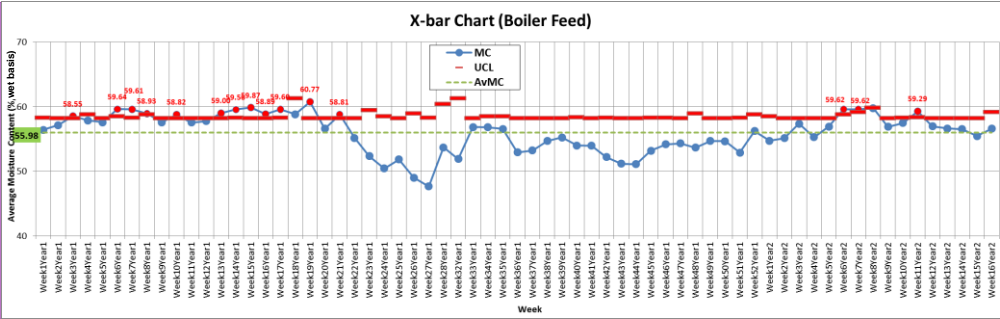
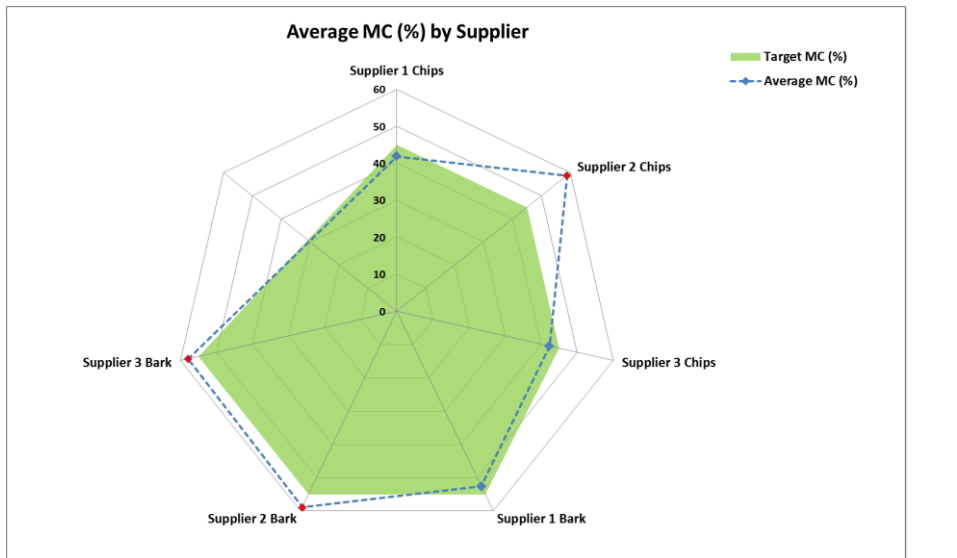


Figure 15. Carte X-barre de la biomasse sortante (vers la chaudière). (THmoy, taux d'humidité moyen; TH, taux d'humidité; LSC, limite supérieure de contrôle)

### Cartes radar

Tous les outils décrits ci-dessus peuvent servir à établir des représentations visuelles d'un attribut de qualité : taux d'humidité, valeur énergétique, contamination, pourcentage de particules fines ou surdimensionnées, etc. Dans certains cas, cependant, les gestionnaires de CQ peuvent souhaiter comparer plusieurs attributs de qualité simultanément ou comparer la performance de divers fournisseurs ou de diverses sources de biomasse. On peut facilement établir des cartes radar avec Excel pour tracer les valeurs réelles ou relatives de divers attributs et intégrer des LSC, des LIC, des cibles et d'autres valeurs pertinentes.

La Figure 16 montre comment une carte radar pourrait comparer le taux d'humidité mensuelle moyenne de chargements reçus de six fournisseurs. Le graphique semble montrer que trois fournisseurs ne respectaient pas le taux d'humidité moyenne cible du client de 45 % pour les copeaux et de 55 % pour l'écorce. Ce type de comparaison peut facilement se faire pour d'autres attributs de qualité.



**Figure 16. Carte radar des valeurs de *taux d'humidité* mensuel moyen par fournisseur. (*TH, taux d'humidité*)**

Les cartes radar peuvent aussi servir à visualiser la performance de divers fournisseurs selon de multiples attributs. La Figure 17 montre des cartes radar où la performance de deux fournisseurs est comparée selon les attributs de qualité de la biomasse suivants : valeur calorifique élevée, taux d'humidité, contamination, pourcentage de particules surdimensionnées et pourcentage de particules fines. Le fournisseur 1 a livré de la biomasse dont la contamination, le pourcentage de particules fines et de particules surdimensionnées étaient sous contrôle, mais le taux d'humidité et la valeur calorifique élevée étaient hors de contrôle. Au contraire, le fournisseur 2 a livré de la biomasse dont la valeur calorifique élevée, le taux d'humidité et la contamination étaient sous contrôle, mais les pourcentages de particules fines et surdimensionnées étaient hors de contrôle.

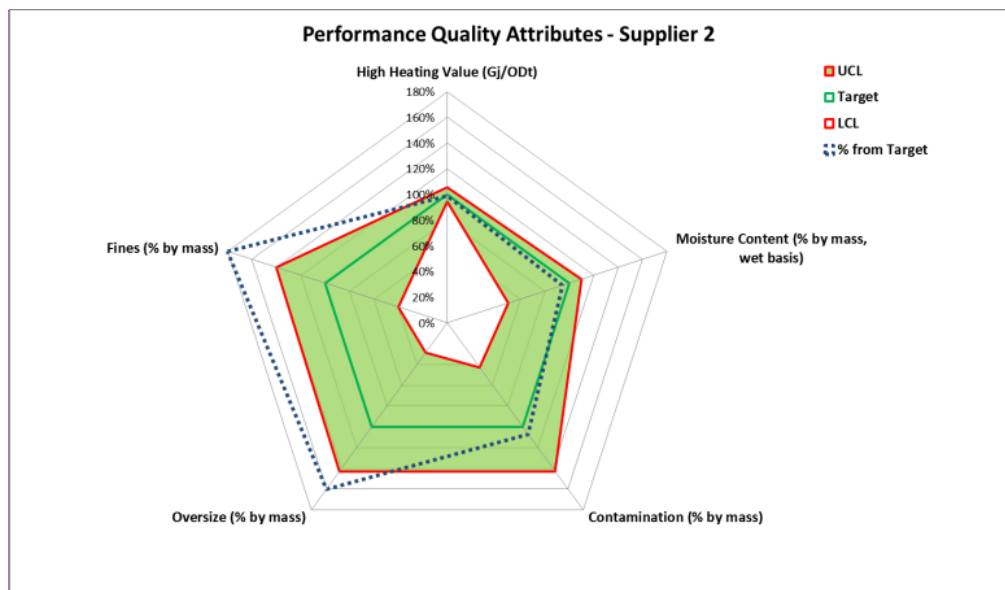


Figure 17. Cartes radar des attributs de performance par fournisseur. (LIC, limite inférieure de contrôle; ta, tonne anhydre; LSC, limite supérieure de contrôle)



Sommaire des outils statistiques de CQ de la biomasse

Le Tableau 1 résume les outils décrits dans le présent rapport et les questions auxquelles ils peuvent répondre :

Tableau 1. Sommaire des outils de CQ

| Outils                   | Questions  |
|--------------------------|--|
| Organigramme             | Quelle est la séquence du processus? Comment et où fait-on l'échantillonnage?          |
| Histogramme              | Comment les données sont-elles distribuées?  |
| Diagramme de Pareto      | Quels sont les problèmes les plus importants?  |
| Diagramme de dispersion  | Y a-t-il des relations entre les attributs? Des tendances?                             |
| Diagramme de progression | Comment la qualité d'un attribut varie-t-elle dans le temps? Des tendances?            |
| Carte de contrôle        | Le processus est-il sous contrôle? Peut-on éliminer des causes spéciales de variation? |
| Carte radar              | Comment comparer de multiples attributs de qualité ou fournisseurs?                    |

Outils commerciaux de CQ

Tous les outils présentés ci-dessus peuvent être conçus à l'interne, dans les bases de données existantes, ou on peut les acheter sous forme de logiciels autonomes. Le Tableau 2 présente certains des outils commerciaux de CQ offerts sur le marché :

Tableau 2. Outils commerciaux de CQ

| Nom du produit | Site Web           | Description   |
|----------------|--------------------|---|
| WinSPC 9.0.2   | www.winspc.com     | 1600 \$US/licence unique. Fonctionne en temps réel. Établit des cartes de contrôle et des rapports. Version d'essai disponible. Soutien et formation disponibles.   |
| QI Macros      | www.qimacros.com   | 399 \$US/licence perpétuelle. Module d'extension pour Excel. Établit des cartes de contrôle, des histogrammes, des diagrammes de Pareto, des diagrammes de dispersion, des organigrammes. Version d'essai disponible. Soutien et formation disponibles. |
| Enact          | www.infinityqs.com | 65 \$US/licence/mois. Outil infonuagique en temps réel. Établit des cartes de contrôle et des rapports. Soutien et formation disponibles.   |
| SCQpack        | www.pqsystems.com  | Établit des cartes de contrôle et des rapports. Version d'essai disponible. Soutien et formation disponibles.   |

Note : Il ne s'agit pas d'une liste complète des outils de contrôle statistique des processus. En fournissant cette liste, FPInnovations n'appuie aucun de ces produits.

Conclusions et recommandations

Pour soutenir la mise en place de pratiques d'approvisionnement en biomasse, un programme scientifique structuré, rigoureux et uniforme de contrôle de la qualité (CQ) est nécessaire. Ce programme doit servir à déterminer les besoins des clients, les sources de variation du produit et des FPInnovations

façons d'éliminer ou de minimiser cette variation dès qu'elle se manifeste. Il doit aussi comprendre un plan de CQ et un protocole d'échantillonnage bien conçus, des méthodes et outils de contrôle statistique des processus, des équipes officielles de CQ et une formation régulière. Le présent rapport a décrit divers outils statistiques de CQ et en a fait la démonstration à l'aide d'exemple de données sur le taux d'humidité de la biomasse. Ces outils peuvent être développés à l'interne ou achetés, mais il est recommandé de les intégrer aux bases de données actuelles (p. ex., LIMS). Les experts de FPInnovations peuvent aider à établir un programme de CQ adapté à une entreprise ou à un produit de biomasse et peuvent former les équipes de CQ en vue du développement et de l'utilisation des outils présentés ici.

## Références

Marinescu, M., Volpé, S., Desrochers, L. et Röser, D. (2015). *Basic procedures for sampling and analyzing woody biomass* (Rapport Avantage, Vol. 15. n° 5.). Pointe-Claire, Québec: FPInnovations.

Annexe

Facteurs des cartes de contrôle

| n  | A     | A2    | A3    | c4     | B3    | B4    | B5    | B6    | d2    | 1/d2   | d3    | D1    | D2    | D3    | D4    |
|----|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 2  | 2.121 | 1.880 | 2.659 | 0.7979 | 0.000 | 3.267 | 0.000 | 2.606 | 1.128 | 0.8862 | 0.853 | 0.000 | 3.686 | 0.000 | 3.267 |
| 3  | 1.732 | 1.023 | 1.954 | 0.8862 | 0.000 | 2.568 | 0.000 | 2.276 | 1.693 | 0.5908 | 0.888 | 0.000 | 4.358 | 0.000 | 2.575 |
| 4  | 1.500 | 0.729 | 1.628 | 0.9213 | 0.000 | 2.266 | 0.000 | 2.088 | 2.059 | 0.4857 | 0.880 | 0.000 | 4.698 | 0.000 | 2.282 |
| 5  | 1.342 | 0.577 | 1.427 | 0.9400 | 0.000 | 2.089 | 0.000 | 1.964 | 2.326 | 0.4299 | 0.864 | 0.000 | 4.918 | 0.000 | 2.114 |
| 6  | 1.225 | 0.483 | 1.287 | 0.9515 | 0.030 | 1.970 | 0.029 | 1.874 | 2.534 | 0.3946 | 0.848 | 0.000 | 5.079 | 0.000 | 2.004 |
| 7  | 1.134 | 0.419 | 1.182 | 0.9594 | 0.118 | 1.882 | 0.113 | 1.806 | 2.704 | 0.3698 | 0.833 | 0.205 | 5.204 | 0.076 | 1.924 |
| 8  | 1.061 | 0.373 | 1.099 | 0.9650 | 0.185 | 1.815 | 0.179 | 1.751 | 2.847 | 0.3512 | 0.820 | 0.388 | 5.307 | 0.136 | 1.864 |
| 9  | 1.000 | 0.337 | 1.032 | 0.9693 | 0.239 | 1.761 | 0.232 | 1.707 | 2.970 | 0.3367 | 0.808 | 0.547 | 5.394 | 0.184 | 1.816 |
| 10 | 0.949 | 0.308 | 0.975 | 0.9727 | 0.284 | 1.716 | 0.276 | 1.669 | 3.078 | 0.3249 | 0.797 | 0.686 | 5.469 | 0.223 | 1.777 |
| 11 | 0.905 | 0.285 | 0.927 | 0.9754 | 0.321 | 1.679 | 0.313 | 1.637 | 3.173 | 0.3152 | 0.787 | 0.811 | 5.535 | 0.256 | 1.744 |
| 12 | 0.866 | 0.266 | 0.886 | 0.9776 | 0.354 | 1.646 | 0.346 | 1.610 | 3.258 | 0.3069 | 0.778 | 0.923 | 5.594 | 0.283 | 1.717 |
| 13 | 0.832 | 0.249 | 0.850 | 0.9794 | 0.382 | 1.618 | 0.374 | 1.585 | 3.336 | 0.2998 | 0.770 | 1.025 | 5.647 | 0.307 | 1.693 |
| 14 | 0.802 | 0.235 | 0.817 | 0.9810 | 0.406 | 1.594 | 0.399 | 1.563 | 3.407 | 0.2935 | 0.763 | 1.118 | 5.696 | 0.328 | 1.672 |
| 15 | 0.775 | 0.223 | 0.789 | 0.9823 | 0.428 | 1.572 | 0.421 | 1.544 | 3.472 | 0.2880 | 0.756 | 1.203 | 5.740 | 0.347 | 1.653 |
| 16 | 0.750 | 0.212 | 0.763 | 0.9835 | 0.448 | 1.552 | 0.440 | 1.526 | 3.532 | 0.2831 | 0.750 | 1.282 | 5.782 | 0.363 | 1.637 |
| 17 | 0.728 | 0.203 | 0.739 | 0.9845 | 0.466 | 1.534 | 0.458 | 1.511 | 3.588 | 0.2787 | 0.744 | 1.356 | 5.820 | 0.378 | 1.622 |
| 18 | 0.707 | 0.194 | 0.718 | 0.9854 | 0.482 | 1.518 | 0.475 | 1.496 | 3.640 | 0.2747 | 0.739 | 1.424 | 5.856 | 0.391 | 1.609 |
| 19 | 0.688 | 0.187 | 0.698 | 0.9862 | 0.497 | 1.503 | 0.490 | 1.483 | 3.689 | 0.2711 | 0.733 | 1.489 | 5.889 | 0.404 | 1.596 |
| 20 | 0.671 | 0.180 | 0.680 | 0.9869 | 0.510 | 1.490 | 0.504 | 1.470 | 3.735 | 0.2677 | 0.729 | 1.549 | 5.921 | 0.415 | 1.585 |
| 21 | 0.655 | 0.173 | 0.663 | 0.9876 | 0.523 | 1.477 | 0.516 | 1.459 | 3.778 | 0.2647 | 0.724 | 1.606 | 5.951 | 0.425 | 1.575 |
| 22 | 0.640 | 0.167 | 0.647 | 0.9882 | 0.534 | 1.466 | 0.528 | 1.448 | 3.819 | 0.2618 | 0.720 | 1.660 | 5.979 | 0.435 | 1.565 |
| 23 | 0.626 | 0.162 | 0.633 | 0.9887 | 0.545 | 1.455 | 0.539 | 1.438 | 3.858 | 0.2592 | 0.716 | 1.711 | 6.006 | 0.443 | 1.557 |
| 24 | 0.612 | 0.157 | 0.619 | 0.9892 | 0.555 | 1.445 | 0.549 | 1.429 | 3.895 | 0.2567 | 0.712 | 1.759 | 6.032 | 0.452 | 1.548 |
| 25 | 0.600 | 0.153 | 0.606 | 0.9896 | 0.565 | 1.435 | 0.559 | 1.420 | 3.931 | 0.2544 | 0.708 | 1.805 | 6.056 | 0.459 | 1.541 |

Pour  $n > 25$

$$A_3 = \frac{3}{c_{4\sqrt{n}}}$$
$$B_3 = 1 - \frac{3}{c_4} \sqrt{1 - c_4^2}$$
$$B_4 = 1 + \frac{3}{c_4} \sqrt{1 - c_4^2}$$



## Siège social

### Pointe-Claire

570, boul. Saint-Jean  
Pointe-Claire (Québec)  
Canada H9R 3J9  
T 514-630-4100

### Vancouver

2665 East Mall  
Vancouver (C.-B.)  
Canada V6T 1Z4  
T 604-224-3221

### Québec

319 rue Franquet  
Québec (Québec)  
Canada G1P 4R4  
T 418-659-2647



NOTRE NOM EST INNOVATION