



Etude sur la tare totale des betteraves sucrières lors de leur livraison à l'usine par le train

Rapport final

Traduction français réalisée par N. Wermeille avec l'aide de DeePL. La version allemande est déterminante.

Bernhard Streit, Lorenz Glauser, Simon Hauser, Martin Häberli-Wyss, Alexandra Poirier et Lorenz Tschumi

En collaboration et avec le soutien des représentants de la Fédération suisse des producteurs de betteraves ainsi que de Sucre Suisse SA.

10.11.2024

Table des matières

1	Introduction	1
1.1	Facteurs d'influence sur la tare totale	1
1.2	Échantillonnage en usine	2
1.3	Méthodes d'interpolation - Estimation de la répartition de la tare totale dans les wagons de chemin de fer	4
1.4	Conditions-cadres et objectifs du projet	7
2	Matériel et méthode	8
2.1	Influence de l'année et du lieu de chargement sur la tare totale	8
2.2	Analyse de la chaîne de transport	8
2.3	Examen préliminaire du prélèvement d'échantillons sur les wagons de chemin de fer avec 15 échantillons aléatoires supplémentaires	8
2.4	Examen principal du prélèvement d'échantillons sur les wagons de chemin de fer avec six échantillons aléatoires supplémentaires	13
3	Résultats et discussion	15
3.1	Grandeurs d'influence sur la tare totale sur la base des analyses des données de 2011 à 2023	15
3.2	Examen préliminaire du prélèvement d'échantillons sur les wagons de chemin de fer avec 15 échantillons aléatoires supplémentaires	20
3.3	Examen préliminaire du prélèvement d'échantillons sur les wagons de chemin de fer avec 15 échantillons aléatoires supplémentaires	25
4	Conclusions	29
4.1	Grandeurs d'influence sur la tare totale sur la base des analyses des données de 2011 à 2023	29
4.2	Examen préliminaire du prélèvement d'échantillons sur les wagons de chemin de fer avec 15 échantillons aléatoires supplémentaires	29
4.3	Examen principal avec six échantillons supplémentaires	29
5	Bibliographie	31

Liste des figures

Figure 1 : Représentation schématique des facteurs influençant la présence de tare totale lors de la livraison de betteraves sucrières à l'usine 2.....	
Figure 2 : Zones prédéfinies (distance par rapport à la paroi latérale) pour le prélèvement des deux échantillons réguliers pour l'analyse des betteraves sucrières lors de la livraison par wagon 2.....	
Figure 3 : Moyenne pondérée des valeurs de référence (= valeurs mesurées) par point de grille (source : Benndorf 2023, p. 139)	4
Figure 4 : Wagon de chemin de fer TYPE EAOS 532 dans l'allée d'échantillonnage (à gauche) et répartition aléatoire des points de prélèvement pour l'étude de l'hétérogénéité de la tare totale au sein du wagon (à droite) 9.....	
Figure 5 : Collaborateur de l'usine lors de l'insertion du poinçon au-dessus du coin du wagon (avant droite), le wagon étant avancé jusqu'au repère jaune 9	
Figure 6 : Écran d'affichage du processus de prélèvement d'échantillons (à gauche) avec un extrait de la représentation de la cupule d'échantillonnage avec indication des coordonnées (à droite, cercles rouges). Coordonnées X = "chat", coordonnées Y = "pont"	10
Figure 7 : Tableau préparé avec les coordonnées ajustées des points d'échantillonnage.	10
Figure 8 : Carte interpolée de la tare totale avec polygones superposés pour l'échantillonnage simulé (1/3 et 2/3 de la largeur du wagon) et points d'échantillonnage générés aléatoirement	13
Figure 9 : Répartition aléatoire des six points d'échantillonnage pour l'étude de la tare totale	14
Figure 10 : Taux moyen de tare totale avec erreur standard (barre d'erreur) dans les betteraves livrées par wagons entre septembre et décembre sur les sites d'Aarberg et de Frauenfeld entre 2011 et 2023. Les moyennes avec différentes lettres diffèrent de manière statistiquement significative ($p < 0.05$)	15
Figure 11 : Taux moyen de tare totale par année avec erreur standard (barre d'erreur) dans les betteraves sucrières livrées par wagons sur les sites d'Aarberg et de Frauenfeld entre 2011 et 2023. Les moyennes avec différentes lettres diffèrent de manière statistiquement significative ($p < 0.05$).	16
Figure 12 : Taux moyen de tare totale avec erreur standard (barre d'erreur) dans les betteraves livrées par wagons, réparties selon le lieu de chargement entre 2011 et 2023. Les moyennes avec différentes lettres diffèrent de manière statistiquement significative ($p < 0.05$).....	17
Figure 13 : Taux moyen de tare totale par année avec erreur standard (barre d'erreur) dans les betteraves livrées par wagons, réparties selon les lieux de chargement qui ont fait l'objet d'une attention particulière dans le projet entre 2011 et 2023. Les moyennes avec différentes lettres diffèrent de manière statistiquement significative ($p < 0.05$)	18
Figure 14 : Taux moyen de tare totale avec erreur standard (barre d'erreur) dans les betteraves livrées par wagons à Aarberg et Frauenfeld entre 2011 et 2023, réparties selon la technique de chargement. Les valeurs moyennes avec des lettres différentes se distinguent de manière statistiquement significative ($p < 0.05$).	18
Figure 15 : Taux moyen de tare totale avec erreur standard (barre d'erreur) dans les betteraves livrées par wagons à Aarberg et Frauenfeld entre 2011 et 2023. Les valeurs moyennes avec des lettres différentes se distinguent de manière statistiquement significative ($p < 0.05$)	19
Figure 16 : Tare totale dans le wagon 33 d'Yvonand - dispersion de la valeur moyenne en fonction du nombre d'échantillons prélevés (de 2 à 15) ; représentation de la différence entre la valeur moyenne de l'échantillon normal (ligne rouge) et celle de 15 échantillons supplémentaires	20
Figure 17 : Répartition de la tare totale dans le wagon d'Yvonand avec points d'échantillonnage ; point zéro (0/0) = avant droit	21
Figure 18 : Carte interpolée de la tare totale du wagon d'Yvonand, avec des zones superposées pour l'échantillonnage simulé (1/3 et 2/3 de la largeur du wagon) et des points d'échantillonnage générés aléatoirement.....	21
Figure 19 : Tare totale dans le wagon 31 de Chavornay - dispersion de la valeur moyenne en fonction du nombre d'échantillons prélevés (de 2 à 15 échantillons) ; représentation de la différence entre la valeur moyenne de l'échantillon normal (ligne rouge) et celle des 15 échantillons supplémentaires.....	22
Figure 20 : Répartition de la tare totale dans le wagon de Chavornay avec points d'échantillonnage ; point zéro (0/0) = avant droit	23
Figure 21 : Carte interpolée de la tare totale du wagon de Chavornay, avec des zones superposées pour l'échantillonnage simulé (1/3 et 2/3 de la largeur du wagon) et des points d'échantillonnage générés aléatoirement	23
Figure 22 : Comparaison du taux d'tare totale en fonction du type d'échantillon pour chaque wagon échantillonné (R = échantillons réguliers ; S = échantillons supplémentaires (tare totale "effectives"))	25
Figure 23 : Résultats du relevé de la tare totale en fonction du type d'échantillon et de la provenance.....	27

Liste des tableaux

Tableau 1 : Vue d'ensemble et comparaison des méthodes d'interpolation fréquemment utilisées	6
Tableau 2 : Paramétrage du krigeage simple dans QGIS.....	12
Tableau 3 : Variables du modèle linéaire	14
Tableau 4 : Tableau d'analyse de la variance pour le paramètre de mesure 'présence de tare totale' dans les betteraves sucrières mesurées sur les sites d'Aarberg et de Frauenfeld (2011 - 2023).....	15
Tableau 5 : Précipitations annuelles (mm) sur les sites de Zollikofen et Winterthur/Seen entre 2011 et 2023 (source : MétéoSuisse) 16	
Tableau 6 : Liste de la moyenne, de l'écart-type, de la valeur min. et max. du prélèvement simulé Yvonand [%].....	22
Tableau 7 : Liste de la moyenne, de l'écart-type, de la valeur min. et max. du prélèvement simulé de Chavornay [%].....	24
Tableau 8 : Aperçu des résultats de l'enquête principale avec six échantillons supplémentaires, triés selon l'origine des livraisons.....	26

Résumé

Sur mandat de la Fédération suisse des betteraviers (FSB) ainsi que de Sucre Suisse SA, une étude a été commandée pour vérifier l'analyse de tare terre lors de la livraison des betteraves à l'usine. Cette tâche a été divisée en un module d'analyse des données et un module de prélèvement d'échantillons.

L'analyse des données des livraisons de betteraves sucrières de 2011 à 2023 a montré que la tare terre était significativement influencée par des facteurs tels que le mois de livraison, l'année, le lieu de chargement et le site de l'usine. L'augmentation prouvée de la tare totale au cours de l'automne peut être attribuée à l'augmentation de l'humidité du sol et à la croissance des betteraves. De même, les systèmes et lieux de chargement en Suisse romande ont montré des valeurs tare terre significativement plus élevées par rapport aux autres sites. Ces différences peuvent éventuellement être attribuées à l'absence ou à la suppression de systèmes de nettoyage dans les systèmes de chargement, qui augmentent la quantité de terre dans le flux de récolte.

Afin de vérifier la précision de l'échantillonnage régulier, des échantillons complémentaires ont été prélevés en différents points du wagon et analysés à l'aide de la méthode géostatistique du krigeage. Les résultats ont montré une grande hétérogénéité dans la répartition de la tare terre au sein des wagons. Cela a entraîné des écarts importants entre les échantillons réguliers et la tare terre réelle, ce qui pourrait dans certains cas entraîner des inexactitudes dans le décompte. Les échantillons supplémentaires ont donné des valeurs moyennes plus précises pour la tare terre et justifient des discussions autour d'une technique d'échantillonnage adaptée.

Les recommandations d'action possibles découlant des présentes analyses sont les suivantes :

- Revoir le concept d'élimination de tare terre dans les stations de chargement sans enterreur et avec des tapis en caoutchouc : La mesure raisonnable du point de vue phytosanitaire et de l'économie du travail, qui consiste à transporter la tare terre à l'usine et à ne pas la séparer sur le lieu de chargement, devrait être étudiée et repensée.
- Eviter de salir davantage les betteraves lors du chargement dans les champs : lors du ramassage des betteraves dans les champs, il faudrait veiller à ce que les outils de ramassage travaillent le plus à plat possible. Cela implique un guidage précis de la machine et la définition de l'emplacement du tas sur un terrain aussi plat que possible.
- Augmentation du nombre d'échantillons réguliers : une augmentation du nombre d'échantillons réguliers pourrait améliorer la dispersion et donc la précision des prélèvements. Il faut toutefois garder à l'esprit que cela allongerait le temps de traitement lors de la livraison à la sucrerie et entraînerait des coûts supplémentaires. Une alternative consisterait à prélever sporadiquement un troisième échantillon sur des wagons choisis au hasard afin de vérifier la répartition des données.
- Amélioration de l'analyse mathématique des valeurs aberrantes et des anomalies : Une analyse mathématique affinée permettant d'identifier les écarts dans les deux sens, aussi bien les valeurs basses que les valeurs élevées, pourrait contribuer à détecter précocement les anomalies peu claires lors de la livraison.
- Mesures visant à réduire l'hétérogénéité de la tare terre dans les wagons : une analyse détaillée des différentes méthodes de chargement et de leur influence sur la répartition de la tare terre dans les wagons est nécessaire. De même, d'autres facteurs d'influence tels que les conditions météorologiques au moment de la récolte, les méthodes de récolte, les informations sur les parcelles, le stockage, le transport et le processus de chargement devraient être étudiés plus en détail afin de comprendre et de réduire leur effet sur la tare totale.
- Aide à l'identification des écarts par des systèmes de caméras : L'utilisation de caméras tout au long de la chaîne d'échantillonnage - par exemple lors du prélèvement des échantillons, avant le lavage et après le triage final - peut contribuer à la détection précoce des écarts.
- Relier la chaîne de transport pour améliorer la traçabilité : relier plus étroitement la chaîne de transport pour éviter les erreurs systématiques concernant le lieu de chargement, le moment de chargement et le producteur, améliore la traçabilité et permet une analyse plus précise des facteurs d'influence potentiels.

1 Introduction

Malgré le recul des surfaces cultivées, la betterave sucrière fait encore aujourd'hui (état 2022) partie des principales grandes cultures suisses (Erdin 2022), avec 15'628 hectares. En 2022, 3'788 betteraviers au total ont livré environ 1'355'013 tonnes de betteraves sucrières aux deux sucreries d'Aarberg et de Frauenfeld (Sucre Suisse SA (SZU) 2023, 2022). La qualité des betteraves joue un rôle important dans le rendement en sucre. La mesure individuelle des paramètres de qualité des betteraves livrées constitue donc également la base des conditions de prise en charge et du système de paiement dans l'industrie sucrière. La méthode d'analyse utilisée est standardisée et contrôlée en permanence dans le cadre d'analyses parallèles dans les laboratoires des usines d'Aarberg et de Frauenfeld. L'analyse de la tare totale fait partie de l'ensemble des analyses, qui comprennent également les paramètres de teneur de la marchandise livrée.

1.1 Facteurs d'influence sur la tare totale

La tare totale - terre, pierres et débris végétaux qui adhèrent aux betteraves lors de leur livraison à la sucrerie - sont un sujet important dans la production et la transformation des betteraves. Cette tare a une influence sur le paiement des producteurs ainsi que sur la qualité et l'efficacité de la transformation, car les matériaux indésirables doivent être éliminés à grands frais. Différents facteurs influencent l'ampleur de la tare totale, notamment le type de sol, les techniques de culture et de récolte ainsi que les conditions environnementales (figure 1). Le type de sol est un facteur déterminant : les sols limoneux, sableux et argileux diffèrent fortement en termes de structure et d'adhérence. Les sols argileux ont tendance à adhérer davantage aux betteraves, surtout par temps humide, tandis que les sols sableux et limoneux sont souvent moins adhérents et plus faciles à nettoyer. Les systèmes de travail du sol tels que le labour, le travail de conservation du sol et le semis direct ont également une influence. Le labourage rend le sol plus meuble, ce qui peut favoriser l'adhésion de la terre, tandis que le semis direct et les méthodes de conservation maintiennent la structure du sol plus stable et réduisent souvent la présence de tare totale. La variété de betterave sucrière elle-même est un autre facteur d'influence, car différentes variétés peuvent avoir des caractéristiques différentes en termes de fixation de la tare totale et de capacité de nettoyage. L'humidité du sol lors de la récolte est également importante : un sol sec adhère moins aux betteraves, tandis qu'un sol humide ou mouillé provoque des adhérences plus fortes et rend le processus de nettoyage plus difficile. La méthode d'arrachage joue également un rôle, car les arracheuses tractées et automotrices ainsi que le type d'arracheuse de betteraves ont des effets différents sur la propreté des betteraves récoltées. Certaines arracheuses sont équipées de systèmes de nettoyage spéciaux qui réduisent la tare totale. Les méthodes de chargement dans le champ et dans les wagons influencent également la tare totale. En Suisse, les tas de betteraves sucrières dans les champs sont majoritairement débarqués sur des remorques à l'aide de souris de chargement. Outre les réglages des éléments de nettoyage, la profondeur de travail des éléments de ramassage détermine la quantité de terre supplémentaire qui arrive dans le flux de récolte. Lors du chargement dans les wagons, un nettoyage manuel ou automatique supplémentaire peut minimiser la présence de terre. Ces derniers temps, les éléments de nettoyage ont été supprimés dans les grandes stations de chargement dans le but de transporter toute la terre dans des wagons et de la faire éliminer à l'usine. La technique de déversement joue également un rôle, car les betteraves peuvent être nettoyées ou à nouveau contaminées par de la terre et des résidus végétaux lors de ce processus. Le moment de la récolte et les conditions météorologiques avant et pendant la récolte, comme la sécheresse, la pluie ou le gel, influencent également l'adhérence au sol. Le gel peut durcir le sol et réduire l'adhérence, tandis que la pluie crée des conditions boueuses qui favorisent l'adhérence de la terre. Dans la sucrerie, le prélèvement d'échantillons et les analyses sont effectués afin d'évaluer la tare totale et de fournir, avec le processus d'analyse prédéfini, la base pour les décomptes individuels.

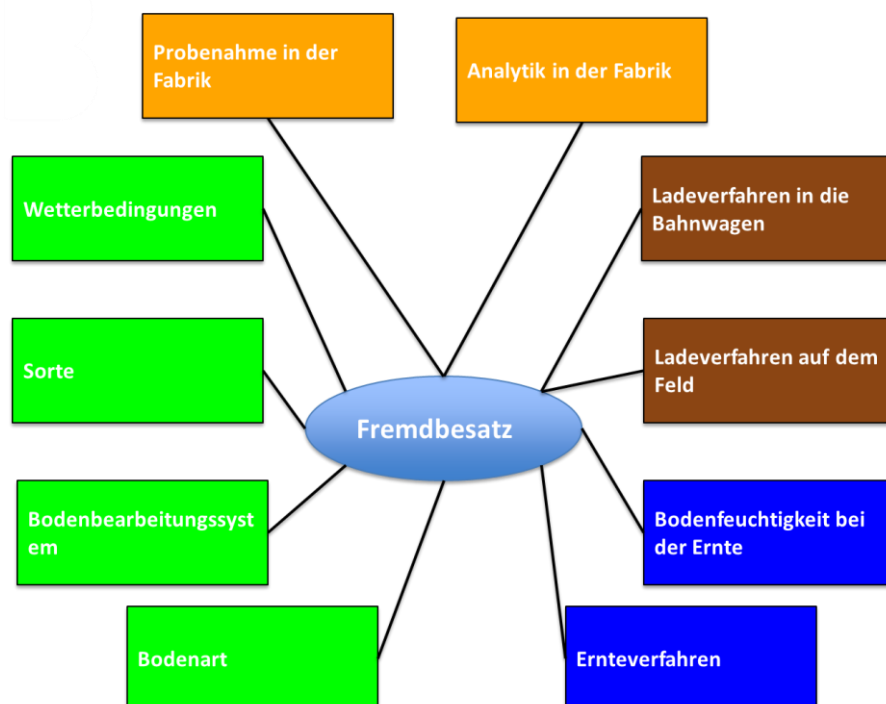


Figure 1 : Représentation schématique des facteurs influençant la présence de tare totale lors de la livraison des betteraves à l'usine.

1.2 Échantillonnage en usine

Un échantillon de chaque livraison de betteraves est prélevé et analysé à la fabrique. Outre la détermination de la teneur en sucre, de la teneur en alcali et de la teneur en azote alpha-aminé, la présence de tare sous forme de terre, de pierres, de têtes de betteraves, de feuilles de betteraves, de mauvaises herbes et d'autres éléments étrangers est également relevée lors de la livraison à la sucrerie. Les échantillons sont prélevés et analysés selon une méthode approuvée par Sucre Suisse SA (SZU) et la Fédération suisse des betteraviers (FSB), définie dans un catalogue de méthodes établi en commun. Conformément à ce catalogue, des échantillons de betteraves représentatifs sont prélevés à l'aide de sondes. Dans le cas des livraisons par véhicules routiers, le prélèvement d'échantillons se fait de manière aléatoire, alors que dans le cas des wagons de chemin de fer, deux échantillons réguliers sont prélevés à une distance de $\frac{1}{3}$ et $\frac{2}{3}$ de la largeur du wagon par rapport à la paroi latérale (figure 2) (Sucre Suisse SA SZU et Fédération suisse des planteurs de betteraves sucrières (FSB) 2022).

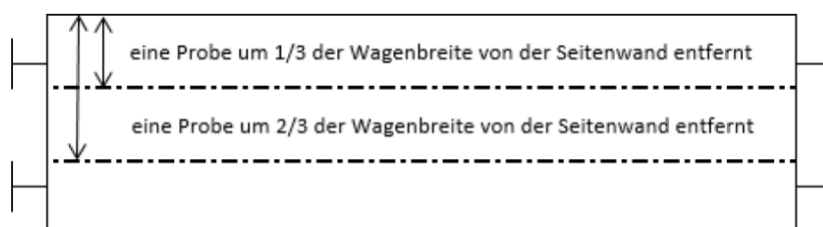


Figure 2 : Zones prédéfinies (distance par rapport à la paroi latérale) pour le prélèvement des deux échantillons réguliers destinés à l'analyse des betteraves sucrières lors de leur livraison par wagon.

Comme il n'est généralement pas pratique ni rentable de réaliser une enquête complète sur la population, on utilise des échantillons. L'objectif principal des échantillons est d'obtenir des informations sur les caractéristiques et leur comportement au sein de la population. Il n'est toutefois jamais possible de tirer des conclusions à 100 % d'un échantillon à la population. Pour s'assurer que les échantillons sont néanmoins aussi représentatifs que possible, ils sont tirés selon un mécanisme aléatoire spécifique. Dans le cas d'un échantillon aléatoire simple, chaque sous-ensemble, et donc chaque unité d'enquête de la population, a la même probabilité d'être inclus dans l'échantillon et une distorsion systématique des données est évitée. La valeur de la proportion observée dans l'échantillon sert d'estimateur de la proportion "effective" dans l'ensemble de la population. La précision de cette estimation dépend de la taille de l'échantillon, de la qualité de l'erreur d'estimation et de la qualité de l'échantillon et influence sa représentativité. (Fahrmeir et al. 2016, 21-23.172)

La théorie de l'estimation statistique aide à évaluer le contenu informatif des échantillons - une distinction étant faite entre l'estimation ponctuelle et l'estimation par intervalle (Faik 2015, p. 293-304 ; Fahrmeir et al. 2016, p. 337-356).

1. Dans l'estimation ponctuelle, on essaie d'estimer le plus précisément possible une certaine valeur de paramètre de la population (généralement la valeur attendue et la variance) au moyen d'une fonction d'estimation.
2. Lors de l'estimation par intervalles, on calcule, comme le nom l'indique, des intervalles dits de confiance pour le résultat de l'estimation. La probabilité d'erreur (α) indique la probabilité que le paramètre "effectif" de la population ne se trouve pas dans l'intervalle calculé. La "vraie" valeur se trouve donc avec une probabilité de $1 - \alpha$ à l'intérieur de l'intervalle.

La fonction d'estimation doit alors répondre aux exigences suivantes (Faik 2015, p. 294-297) :

1. **L'espérance** signifie que la valeur attendue du paramètre de l'échantillon ne s'écarte que légèrement du paramètre de la population, il n'y a donc qu'une faible distorsion (biais) de l'échantillon. valeur "effective". Ce biais diminue avec l'augmentation de la taille de l'échantillon.
2. **La cohérence** de l'estimateur signifie que le biais et la variance de l'estimateur convergent tous deux vers zéro à mesure que la taille de l'échantillon augmente, ce qui conduit à une approximation de plus en plus précise de la valeur "effective" du paramètre de la population.
3. **Efficacité** : est considérée comme efficace la fonction d'estimation qui, parmi toutes les fonctions d'estimation non biaisées, présente la variance la plus faible et fournit ainsi l'estimation la plus précise.

Ces exigences peuvent être calculées à l'aide de la méthode du maximum de vraisemblance (Faik 2015, p. 295-296).

Il s'avère que la taille et le caractère aléatoire d'un échantillon influencent sa représentativité. En prélevant un grand nombre d'échantillons à des points aléatoires dans les différentes zones du wagon, il s'agit d'estimer le plus précisément possible le taux de tare et de minimiser les distorsions. En prélevant un plus grand nombre d'échantillons et en les répartissant sur l'ensemble du wagon, on peut s'assurer que l'estimation obtenue est représentative de l'ensemble du lot et qu'elle n'est pas biaisée par des variations locales.

1.3 Méthodes d'interpolation - Estimation de la répartition de la tare totale dans les wagons de chemin de fer

Les méthodes géostatistiques d'interpolation spatiale permettent d'estimer, sur la base de valeurs de mesure existantes (= points d'appui), les valeurs des caractéristiques des données géographiques et leur répartition dans une zone déterminée pour des points non échantillonnés - ou, dans le cadre de ce travail, la part de tare totale à l'intérieur d'un wagon de train (figure 3). Pour la modélisation, un réseau de points discrets est placé sur la zone à modéliser, généralement une grille rectangulaire régulière. Afin de permettre des estimations précises, sa résolution doit être choisie de manière à ce qu'elle corresponde aux exigences du modèle et qu'elle soit raisonnablement proportionnelle à la distance des données de mesure disponibles (valeur indicative : 1/5 de la distance moyenne entre les données) (Benndorf 2023, p. 135-138).

La base d'estimation centrale est la variabilité spatiale. Elle décrit la manière dont les caractéristiques des points de mesure varient en termes de répartition et d'intensité sur une zone géographique. Elle fournit des informations sur les modèles, les corrélations possibles et les tendances au sein de l'espace étudié. Une possibilité d'analyser cette variabilité spatiale d'une variable est le variogramme expérimental, qui est calculé directement à partir des données mesurées. Il mesure la variation quadratique moyenne entre des paires de mesures en fonction de leur distance spatiale. C'est un outil empirique de représentation de la variance spatiale des données. L'autocorrélation empirique est une mesure alternative au variogramme expérimental. Elle décrit la relation d'une variable avec elle-même en fonction de la distance spatiale (Benndorf 2023, p. 69-76). Afin de pouvoir déduire des valeurs représentatives de la variabilité spatiale pour n'importe quel point de la grille, un modèle mathématique, le variogramme théorique, est créé et adapté au variogramme expérimental. Il s'agit d'un outil de modélisation et d'une valeur d'entrée centrale dans les procédures d'interpolation géostatistique. (Benndorf 2023, S.122-126) En général, la valeur estimée (Z^*) à l'endroit x_0 résulte de la moyenne pondérée des points d'appui considérés aux endroits x_1 à x_n .

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot Z(x_i)$$

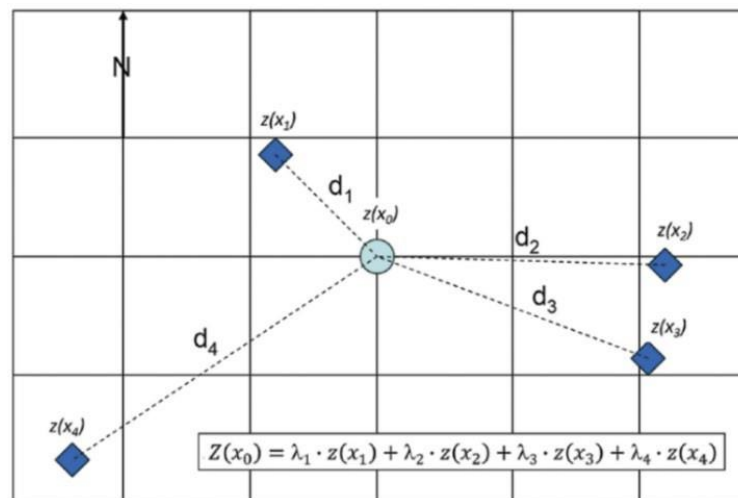


Figure 3 : Moyenne pondérée des valeurs de référence (= valeurs mesurées) par point de grille (source : Benndorf 2023, p. 139)

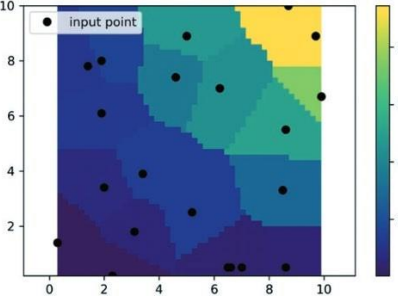
La pondération (λ_i) de chaque point d'appui est déterminante et tient compte avant tout :

- **Distance au point d'estimation** : les points de données plus proches reçoivent un poids plus important.
- **Variabilité spatiale** : les pondérations reflètent la variabilité spatiale du caractère.
- **Les effets de cluster**, qui résultent de points de données proches les uns des autres et contenant des informations redondantes (cf. fig. 2 : $Z(x_2)$ & $Z(x_3)$), peuvent entraîner des distorsions des résultats et doivent donc être pris en compte dans la pondération.
- **Éviter les erreurs d'estimation** : Les pondérations ne doivent pas générer de surestimations ou de sous-estimations systématiques.

La prise en compte des facteurs énumérés permet de générer des valeurs interpolées précises et proches de la réalité (Benndorf 2023, p. 138-139).

En géostatistique, il existe plusieurs modèles d'interpolation qui se distinguent principalement par la prise en compte des relations spatiales et par la puissance de calcul nécessaire (tableau 1).

Tableau 1 : Vue d'ensemble et comparaison des méthodes d'interpolation fréquemment utilisées

	Méthode du plus proche voisin	Pondération inverse de la distance	Interpolation polynomiale & spline	Kriging
Brève description	La pondération du point d'appui est $\lambda = 1$. la valeur du point de repère le plus proche est ainsi attribuée à chaque point de la grille. Il en résulte des zones polygonales ayant chacune la même valeur. 	La pondération (λ_i) pour les points de données diminue de manière inversement proportionnelle à l'augmentation de la distance (d_i). L'exposant (p) peut être défini par l'utilisateur et détermine à quelle vitesse l'influence des points de repère diminue avec la distance - plus p est élevé, plus cette influence diminue rapidement. Lors de l'interpolation, ce sont donc principalement les points de données les plus proches qui influencent l'estimation, en particulier sur les grandes grilles.	Lors de l'interpolation polynomiale, une représentation fonctionnelle aussi représentative que possible de la surface doit être générée au moyen d'une fonction d'interpolation pour la zone de valeurs correspondante. Pour chaque nombre de points de repère (n), il existe exactement un polynôme d'interpolation de degré 1 (n-1)-ième degré, qui passe par tous les points d'appui considérés. Il s'agit de trouver cette fonction. Dans le cas de l'interpolation spline, on ne calcule pas un polynôme unique pour tous les points d'appui considérés, mais une fonction d'interpolation séparée pour chaque intervalle individuel entre deux points d'appui.	Pour une estimation aussi précise que possible des valeurs ponctuelles inconnues, la caractéristique est décomposée en trois composantes. $Z(x) = m(x) + S(x) + \varepsilon$ - déterministe tendance $m(x)$ (tendance prévisible à grande échelle des données de mesure) - signal corrélé stochastiquement $S(x)$ (modèle de valeurs à moyenne échelle résultant de la proximité des points de données) - bruit aléatoire constant ε (variabilité aléatoire non explicable par $m(x)$ et $S(x)$) $S(x)$ et ε sont saisis dans le variogramme.
Variabilité spatiale	est ignoré	est pris en compte	est pris en compte	est une fonction essentielle
Précision et erreur d'interpolation	Variable - En cas de répartition irrégulière des valeurs inconnues effectives peuvent être de grandes erreurs d'interpolation peuvent se produire. Discontinuité et grands sauts possibles sur les bords des polygones.	Moyenne - Les effets de cluster ne sont pas pris en compte, ce qui peut entraîner une surreprésentation des zones locales dans l'estimation. peuvent être surestimés. Le choix de l'exposant est basé sur l'expérience de l'utilisateur et est donc quelque peu arbitraire. Des exposants élevés peuvent entraîner des effets "BullsEye", des pointes d'aiguille écarts dans les points d'appui.	Élevé - L'interpolation polynomiale peut entraîner une forte oscillation à partir des polynômes du 8e degré et donc des estimations imprécises de la valeur entre les points de repère. L'interpolation par spline contrecarre ce problème et fournit des résultats bien plus précis.	Très élevé - La décomposition en composantes individuelles rend les estimations plus précises. La méthode permet également de réaliser des modélisations pour des expressions de caractéristiques à forte tendance. Les fonctions de tendance plus complexes nécessitent un plus grand nombre de points de données dans l'environnement immédiat.
Complexité et application	Simple et efficace en termes de calcul	Simple calculé efficace et La pondération est intuitive	Simple et efficace en termes de calcul	plus complexe à calculer
Source	(Benndorf 2023, p. 139-140)	(Benndorf 2023, p. 142-144)	(Benndorf 2023, p. 147-149 ; Bärwolff 2016, p. 129-137 ; Walz 2020, p. 1-9)	(Benndorf 2023, p. 159-174 ; Webster 2007, 153-155, 183-184)

Les méthodes telles que la méthode du plus proche voisin, la pondération inverse des distances ou l'interpolation polynomiale et spline permettent, grâce à leur simplicité et à leur efficacité de calcul, de créer rapidement des modèles pour des applications simples, même si l'on ne dispose que de quelques points de données. En contrepartie, ils ne tiennent souvent compte de la variabilité spatiale que de manière indirecte, voire pas du tout, et ne peuvent estimer les incertitudes des modèles que de manière partiellement réaliste. En revanche, le krigeage est plus complexe, mais il fournit des résultats plus précis.

Le choix de la méthode dépend des objectifs spécifiques de l'analyse, des caractéristiques des données et de la précision des résultats recherchés.

1.4 Cadre et objectifs du projet

Par le passé, les producteurs de betteraves sucrières ont déposé à plusieurs reprises une plainte auprès de la sucrerie en raison d'un taux de tare totale trop élevé et ont mis en doute le fait que la méthode utilisée fournisse des valeurs de la tare totale représentatives pour l'ensemble du wagon ferroviaire. Il a été supposé que la terre se répartissait de manière inégale dans le wagon lors du chargement des betteraves, surtout en cas de chargement latéral sans tamisage supplémentaire de la terre et en cas de récoltes à partir de sols organiques. C'est pourquoi une rencontre entre les représentants de la sucrerie et les betteraviers a été convoquée le 30 mai 2023 à la Haute école des sciences agronomiques, forestières et alimentaires (HAFL), afin de discuter des causes possibles et des solutions à apporter à ces divergences. Dans le cadre de cette rencontre, il a été décidé de confier à la HAFL un projet visant à étudier les trois aspects partiels suivants et à proposer, le cas échéant, des adaptations de la méthode.

1. Analyse des facteurs d'influence sur la tare totale dans le champ.
2. Suivi et analyse de la chaîne de transport depuis le lieu de location des betteraves jusqu'à l'usine.
3. Vérification de la méthode d'échantillonnage à la sucrerie d'Aarberg

Le projet couvrait la campagne betteravière 2023 et a débuté en novembre 2023.

D'ici fin 2023, des prélèvements supplémentaires sur les livraisons de betteraves sucrières par train permettront de vérifier si la méthode de détermination de la tare totale utilisée aujourd'hui par la sucrerie d'Aarberg est représentative des tares totales "effectives" dans chaque wagon de train.

Il s'agit de clarifier comment...

1. ... exactement les deux échantillons réguliers correspondent en moyenne à la part "effective" de tare totale de la livraison ?
2. ... la tare totale est répartie sur les wagons à l'arrivée à Aarberg ?
3. ... la variance de la tare totale moyenne se comporte-t-elle lorsque le nombre d'échantillons pour son relevé est modifié ?

2 Matériel et méthode

2.1 Influence de l'année et du lieu de chargement sur la tare totale

Afin d'analyser les facteurs qui influencent le taux d'utilisation par des tiers, Sucre Suisse SA a mis à disposition un fichier en format Excel qui contient les informations les plus importantes sur les livraisons aux deux sucreries entre 2011 et 2023, au total 738.461 livraisons pour tous les modes de transport (route et rail) :

- Numéro de commande (numéro d'échantillon),
- livraison supplémentaire (oui ou non),
- Numéro de la plante,
- Date de livraison,
- Poids net des betteraves,
- Lieu d'arrivée,
- Nom de la station de chargement (uniquement pour le transport ferroviaire)
- Tare totale (en %).

Pour une analyse statistique efficace de ces données, un script a été créé dans le logiciel R (version 2022.07.2 Build 576), qui a notamment permis d'effectuer des analyses de variance ANOVA. L'ANOVA est un test statistique utilisé pour évaluer les différences entre les moyennes de plus de deux groupes. Il est ainsi possible d'examiner si une différence de moyennes est influencée par différents facteurs ou si elle est due au hasard. Avant l'analyse statistique, les données ont été transformées de manière logarithmique pour améliorer la distribution normale.

2.2 Analyse de la chaîne de transport

Différentes méthodes de chargement dans les champs et dans les gares ont été caractérisées et analysées à l'aide de protocoles photographiques.

2.3 Examen préliminaire du prélèvement d'échantillons sur les wagons de chemin de fer avec 15 échantillons aléatoires supplémentaires

Dans un premier temps, l'échantillonnage de deux livraisons de betteraves a été effectué le 7 novembre 2023 à la sucrerie d'Aarberg, avec 15 échantillons supplémentaires par livraison. L'objectif principal de ces échantillonnages était de relever l'hétérogénéité de la tare totale à l'intérieur du wagon et de déterminer la variance de l'impureté moyenne en fonction du nombre d'échantillons. La première livraison a été chargée à Chavornay avec une rampe stationnaire, celle d'Yvonand avec une souris. Toutes les livraisons ont été transportées dans des wagons de marchandises ouverts de type EAOS 532 avec une surface de chargement de 12800 x 2760 mm.

Tous les prélèvements d'échantillons et la détermination du taux de tare totale ont été effectués conformément au catalogue des méthodes (version courte) pour la prise en charge et l'analyse des betteraves par Sucre Suisse SA (Sucre Suisse SA (SSSA) et l'Association suisse des betteraviers (ASB) 2022). Le système de prélèvement de l'entreprise a été utilisé pour les échantillonnages (fabricant : Venema Sugar Installations, automatisation partielle en 2017 par Alpiq (aujourd'hui Bouygues) ; entretien : Bouygues (groupe Alpiq 2017)).

Pour les deux livraisons, les deux échantillons réguliers ont d'abord été prélevés selon les instructions du catalogue des méthodes et leurs coordonnées ont été notées par l'indicateur du système (voir fig. 4 et 5). Ces échantillons ont été prélevés automatiquement par le piqueur à 1/3 de la surface du wagon et à 3 m, ainsi qu'à 2/3 de la surface du wagon et à 9 m. Pour le relevé, des échantillons supplémentaires ont ensuite été prélevés en 15 points prédéfinis. On a procédé de la manière suivante :

- Définition des coordonnées des 15 points d'échantillonnage :

Un système de coordonnées XY en miroir sur l'axe Y a été placé sur le wagon, avec le point zéro (0/0) sur le coin 'avant droit' du wagon, le plus proche de la cabine du piqueur (figure 4). Afin d'éviter d'endommager le piqueur d'essai et le wagon, une distance minimale de 40 cm a été définie entre les points de prélèvement extrêmes et le centre de la paroi du wagon. La marge ainsi obtenue

n'a pas été prise en compte pour l'échantillonnage. La surface résiduelle a été divisée en 15 (3 x 5) sous-surfaces. Les échantillons ont été prélevés aux coins de cette surface résiduelle (échantillons 1, 3, 13, 15), ainsi qu'à des endroits choisis au hasard. Points à l'intérieur de de la zone le reste de sous-surfaces.

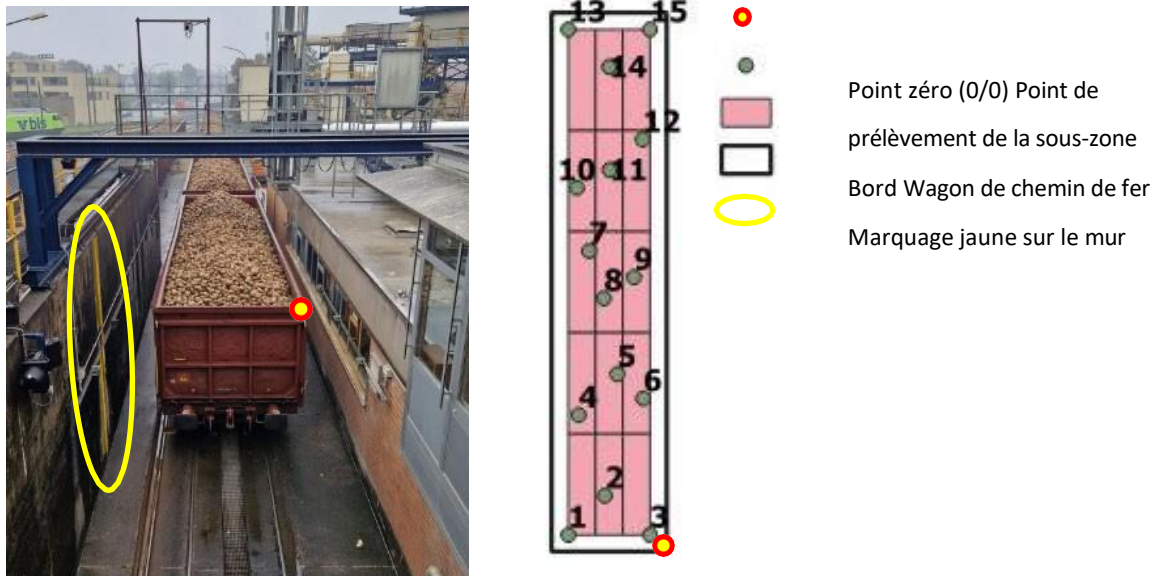


Figure 4 : Wagon de chemin de fer TYPE EAOS 532 dans l'allée d'échantillonnage (à gauche) et répartition aléatoire des points d'échantillonnage pour relever l'hétérogénéité de la tare totale à l'intérieur du wagon (à droite)



Figure 5 : Collaborateur de l'usine lors de l'insertion du poinçon au-dessus de l'angle du wagon (avant droite), les wagons étant avancés jusqu'au marquage jaune.



Figure 6 : Écran d'affichage du processus de prélèvement d'échantillons (à gauche) avec un extrait de la représentation de la cupule d'échantillonnage avec indication des coordonnées (à droite, cercles rouges).
Coordonnées X = "chat", coordonnées Y = "pont".

Wagen Nr.	315659639308	Laufnummer	53748	Herkunft:	Chavornay			
	Koordinaten Nullpunkt angepasst 'vorne rechts'							
	X (Katze)	Y (Brücke)						
Alle Angaben in cm	274	5						
autom. Probenahme					X autom.	Y autom.	Probenummer	
a					452	299	53748_0	
b					359	902	53748_1	
					bei Abweichung von "X/Y-angepasst" ausfüllen		Rückrechnung auf 0/0 neu 'vorne rechts'	
Punkt Nr	X Ursprung	Y Ursprung	X angepasst	Y angepasst	X effektiv	Y effektiv	Probenummer	x y
1	236	40	510	45	487	41	90000	-213 36
2	148	132	422	137	420	134	90001	-146 129
3	40	40	314	45	311	45	90002	-37 40
4	211	324	485	329	488	332	90003	-214 327
5	119	421	393	426	396	421	90004	-122 416
6	57	363	331	368	333	368	90005	-59 363
7	186	713	460	718	458	715	90006	-184 710
8	151	601	425	606	421	609	90007	-147 604
9	78	651	352	656	351	658	90008	-77 653
10	215	863	489	868	490	864	90009	-216 859
11	137	906	411	911	407	916	90010	-133 911
12	57	978	331	983	335	983	90011	-61 978
13	236	1240	510	1245	491	1199	90014	-217 1199
14	138	1151	412	1156	410	1091	90015	-136 1091
15	40	1240	314	1245	296	1198	90013	-22 1198
16					488	1067	90012	-214 1062

Figure 7 : Tableau préparé avec les coordonnées ajustées des points d'échantillonnage.

- Prélèvement des 15 échantillons :

Pour une saisie précise des coordonnées de l'échantillon, le wagon a été placé contre la paroi conformément au marquage jaune. Ensuite, l'emporte-pièce a été placé au-dessus de l'angle du wagon à l'avant droit. Centré (fig. 4). Les coordonnées du piqueur affichées sur l'écran de l'installation correspondent au point zéro du piqueur et ont été saisies dans le fichier Excel préparé auparavant sous "Coordonnées point zéro adapté" (fig. 6). La coordonnée X correspond à la valeur "chat", la coordonnée Y à la valeur "pont" sur l'écran d'affichage (fig. 5). Le tableau Excel a ainsi été calibré sur la position actuelle du piqueur comme point zéro. Les valeurs qui viennent d'être saisies ont été ajoutées aux points d'échantillonnage définis précédemment (X / Y origine) et donnent les valeurs "X ajusté" et "Y ajusté". Pour le prélèvement des 15 échantillons, le piqueur a été positionné manuellement avec la plus grande précision possible aux coordonnées ajustées au point zéro. La position exacte du piqueur (X / Y effectif) a été notée dans la feuille Excel avec le numéro d'échantillon interne à l'usine. A l'aide des coordonnées effectives des échantillons et du point zéro adapté, Excel a immédiatement calculé les coordonnées pour un système de coordonnées sans réflexion sur l'axe Y (Fig. 6 - Calcul rétroactif sur 0/0 = nouveau 'avant droit'). Comme la portée du piqueur n'était pas suffisante pour les échantillons 13 à 15, le wagon a dû être déplacé de 130 cm en direction de la cabine de conduite pour ces échantillons (Y-

axe) ont été avancées. Les coordonnées effectives ont été corrigées en conséquence dans Excel. Lors de la livraison de Chavornay, un de ces échantillons a été prélevé par erreur avant que le wagon ne soit repositionné. Cet échantillon est entouré en rouge sur la figure 5 et n'a pas été pris en compte dans les analyses des données. Ensuite, les différents échantillons ont été analysés selon le catalogue des méthodes (version courte) pour la prise en charge et l'analyse des betteraves par Sucre Suisse SA (Sucre Suisse SA (SSSA) et l'Association Suisse des Betteraviers (ASB) 2022) en ce qui concerne la tare totale, leurs teneurs et leurs rendements. Dans la suite de l'article, seule la teneur en tare totale sera abordée.

Les résultats pour la tare totale ont été attribués aux coordonnées correspondantes à l'aide du numéro d'échantillon interne à l'usine noté. Les programmes QGIS (version 3.34.0-Prizren) et RStudio (version 2023.09.1 Build 494) ont été utilisés pour l'analyse statistique.

Simulation de l'influence du nombre d'échantillons sur la variance et la valeur moyenne "effective" de la tare totale mesurée :

A l'aide du coefficient binomial $C(n,k)$, on a calculé, pour toutes les combinaisons possibles des 15 échantillons, comment la variance des valeurs moyennes pour la tare totale des échantillons prélevés varie en fonction du nombre d'échantillons par wagon. Le coefficient binomial a été calculé à l'aide de la formule suivante :

$$C(n, k) = \frac{n!}{k!(n - k)!}$$

Les nombres d'échantillons allant de 14 échantillons sur 15 à 2 échantillons sur 15 ont été pris en compte. Les valeurs moyennes obtenues ont servi de base au calcul de la variance au sein de chaque nombre d'échantillons.

Le logiciel R 4.3.1 avec les packages "openxlsx" (Schauberger et Walker 2023), "readxl" (Wickham et Bryan 2023), "writexl" (Ooms 2024), "dplyr" (Wickham et François 2023), "ggplot2" (Wickham 2016), "gridExtra" (Auguie 2017) a été utilisé pour le calcul et la représentation des variances par taille de combinaison, "patchwork" (Pedersen 2024) et "rstudioapi" (Ushey et al. 2023) sont utilisés.

- Vérification de l'homogénéité de la répartition de la tare totale dans les wagons de chemin de fer par krigeage :

A partir des 15 échantillons collectés, une carte de la tare totale du wagon a été établie à l'aide du krigeage simple. Comme nous l'avons déjà décrit au point 3 *Méthodes d'interpolation*, le krigeage est une méthode issue de la géostatistique qui permet d'estimer par interpolation des valeurs pour des sites sans échantillon disponible à partir de valeurs de mesure collectées voisines (= points de chute) et de leur distance par rapport au site recherché. Le krigeage se caractérise par une grande précision d'estimation et permet également des modélisations pour des valeurs de caractéristiques à forte tendance. Dans le cas du krigeage simple, on part du principe que la valeur moyenne (μ) des valeurs relevées et donc la composante de tendance $m(x)$ peuvent être considérées comme constantes (Webster 2007, p. 153-184 ; Benndorf 2023, p. 163). Pour le krigeage simple, le plugin "Processing Saga NextGen Provider" (Olaya 2023) a été utilisé dans QGIS (tableau 2). Ensuite, le système de coordonnées cartésiennes créé pour l'échantillonnage (surface totale du wagon) a été complété par un axe Z avec les valeurs d'analyse interpolées par le krigeage simple.

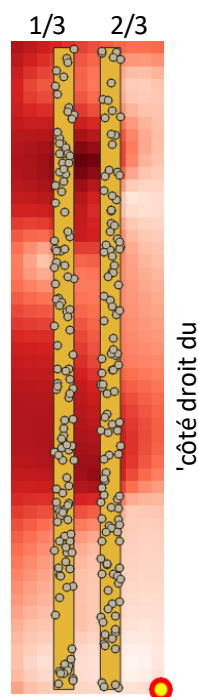


Figure 8 : Carte de la tare totale interpolée avec polygones superposés pour l'échantillonnage simulé (1/3 et 2/3 de la largeur du wagon) et points d'échantillonnage générés aléatoirement.

2.4 Examen principal de l'échantillonnage des wagons de chemin de fer avec six échantillons aléatoires supplémentaires

Dans une deuxième étape, neuf autres livraisons ont été analysées sur la base des résultats de l'étude préliminaire, avec seulement six échantillons supplémentaires, l'accent étant mis sur l'écart du taux de tare totale entre les échantillons supplémentaires (taux de tare totale "effectif" approximatif) et les deux échantillons réguliers. Pour ce faire, trois livraisons ont été échantillonnées respectivement à Nyon (14 décembre 2023), Chavornay (19 décembre 2023) et Cossonay (20 décembre 2023). A Nyon, les wagons sont chargés au moyen d'une souris à Chavornay et Cossonay au moyen d'une rampe stationnaire. Pour le contrôle principal également, tous les échantillonnages et la détermination ultérieure du taux de tare totale ont été effectués conformément au catalogue des méthodes (version abrégée) pour la prise en charge des betteraves et le contrôle des betteraves par Sucre Suisse SA (Sucre Suisse SA (SZU) et Association suisse des betteraviers (ASB) 2022) et le système de prélèvement propre à l'entreprise a été utilisé (fabricant : Venema Sugar Installations, automatisation partielle en 2017 par Alpiq (aujourd'hui Bouygues) ; entretien : Bouygues (Groupe Alpiq 2017)). Toutes les livraisons ont été transportées dans des wagons de marchandises ouverts de type EAOS 532 avec une surface de chargement de 12800 x 2760 mm.

- Échantillonnage des livraisons avec six échantillons supplémentaires

La procédure pour les prélèvements avec six échantillons supplémentaires correspond en principe à celle de l'enquête préliminaire avec 15 échantillons supplémentaires. Pour toutes les livraisons, les deux échantillons réguliers ont également été prélevés en premier lieu conformément aux directives du catalogue des méthodes et leurs coordonnées ont été notées sur l'affichage du système. Pour l'enquête, des échantillons supplémentaires ont ensuite été prélevés sur les neuf livraisons en six points prédéfinis.

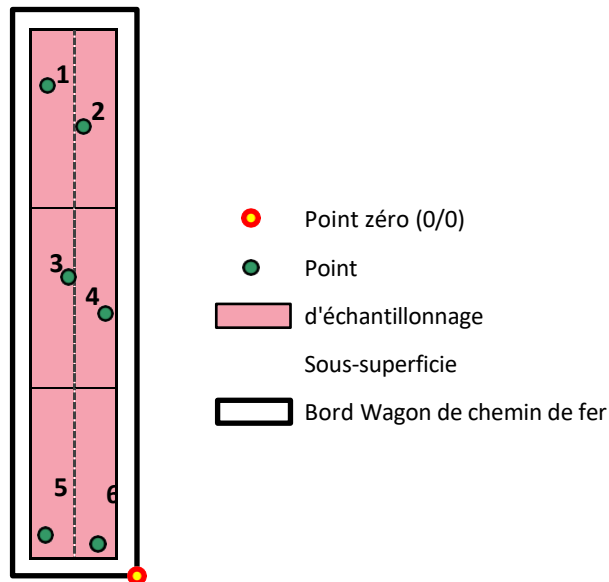


Figure 9 : Répartition aléatoire des six points d'échantillonnage pour l'étude de la tare totale.

Les coordonnées des points d'échantillonnage ont été générées comme suit (cf. fig. 8). Pour cet échantillonnage également, un système de coordonnées XY réfléchi sur l'axe Y a été placé sur le wagon, avec le point zéro (0/0) sur le coin 'avant droit' du wagon, qui est le plus proche de la cabine du piqueur. La surface résiduelle obtenue en déduisant la distance minimale de 40 cm de la paroi du wagon a été divisée en un tiers avant, un tiers central et un tiers arrière, eux-mêmes divisés en deux sous-surfaces le long de l'axe X. Le prélèvement d'échantillons à l'intérieur des sous-surfaces a été effectué de manière aléatoire.

- Analyse statistique de l'enquête principale

Un modèle linéaire mixte a été utilisé pour les analyses des neuf livraisons. Le modèle se composait comme suit :

$$\ln(\text{FB}) = \mu + \text{fixité du type d'échantillon} \times \text{fixité du lieu} + \text{aléa du wagon} + \text{aléa résiduel}$$

Les paramètres sont résumés dans le tableau 3.

Tableau 3 : Variables du modèle linéaire

Variable	Commentaire
FB :	= tare totale
Type d'échantillon :	= échantillon régulier (R), échantillons supplémentaires (S)
Lieu	= Nyon, Chavornay, Cossonay
Wagon :	= Nyon_W612-2, Nyon_W710-1, Nyon_W206-8, Chavornay_W216-4, Chavornay_W508-2, Chavornay_W922-5, Cossonay_W119-7, Cossonay_W136-1, Cossonay_W134-6

Pour les analyses, la variable cible a été transformée de manière logarithmique (ln). Les résultats du modèle sont transformés en retour à l'échelle originale. Le travail a été effectué avec le logiciel R 4.3.1 et les packages "tidyverse" (Wickham et al. 2019), "sjPlot" (Lüdtke 2021a), "sjmisc" (Lüdtke 2018), "sjlabelled" (Lüdtke 2021b), "multcompView" (Graves et al. 2019), "ggpubr" (Kassambara 2020), "lmerTest" (Kuznetsova et al. 2017), "emmeans" (Lenth 2020) et "ggplot2" (Wickham 2016).

Les calculs statistiques ont été effectués à l'aide du logiciel R-Studio (version 2022.07.2 Build 576).

3 Résultats et discussion

3.1 Facteurs d'influence sur la tare totale sur la base des analyses des données de 2011 à 2023

La tare totale mesurée dans les betteraves livrées entre 2011 et 2023 a été influencée de manière significative par les facteurs étudiés, à savoir le mois de livraison, l'année de livraison, le lieu de chargement et l'usine (tableau 4).

Tableau 4 : Tableau d'analyse de la variance pour le paramètre de mesure 'présence de tare totale' dans les betteraves sucrières mesurées sur les sites d'Aarberg et de Frauenfeld (2011 - 2023).

Facteurs d'enquête	Valeur P
Mois	***
Année	***
Lieu de chargement	***
Usine	***

Les valeurs de la tare totale ont augmenté au cours de l'automne, de septembre (5,20 %) à décembre (6,97 %). Les valeurs moyennes des différents mois diffèrent significativement (figure 10). Cette augmentation peut être due, d'une part, à l'augmentation de l'humidité du sol en règle générale et, d'autre part, à la croissance progressive des betteraves et donc à une augmentation de la surface des betteraves.

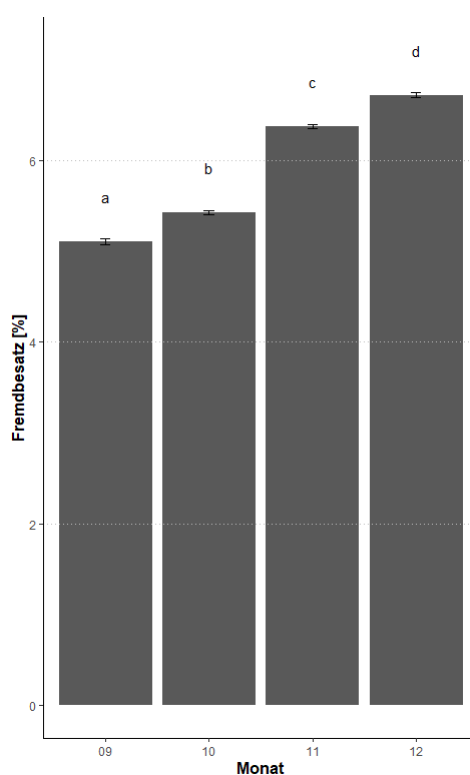


Figure 10 : Taux moyen de tare totale avec erreur standard (barre d'erreur) dans les betteraves livrées par wagons entre septembre et décembre sur les sites d'Aarberg et de Frauenfeld entre 2011 et 2023. Les valeurs moyennes avec différentes lettres se distinguent de manière statistiquement significative ($p < 0.05$).

Le taux de tare totale calculé sur l'ensemble des années était de 6,07 %. La répartition des moyennes annuelles du taux de tare totale entre 2011 et 2023 oscillait entre les valeurs extrêmes de 3,46 % en 2015 et de 1,46 % en 2023. 8,83 % en 2020 (figure 11).

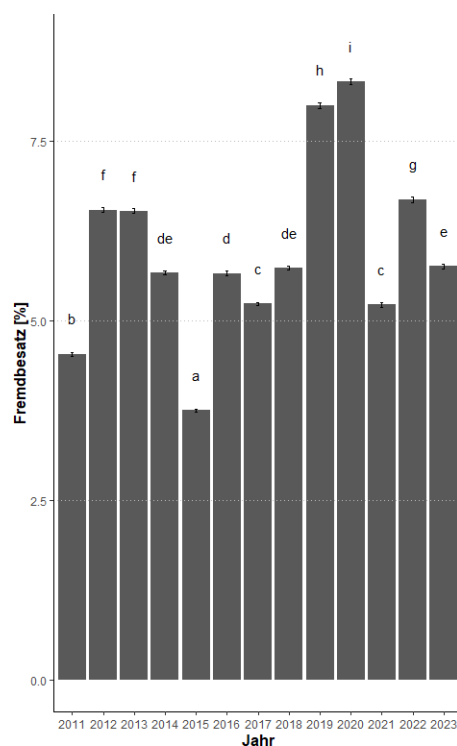


Figure 11 : Taux moyen de tare totale par année avec erreur standard (barre d'erreur) dans les betteraves sucrières livrées par wagons sur les sites d'Aarberg et de Frauenfeld entre 2011 et 2023. Les moyennes avec différentes lettres diffèrent de manière statistiquement significative ($p < 0.05$).

Les précipitations annuelles respectives sur les sites de Zollikofen et de Winterthur/Seen (Tableau 5 : Précipitations annuelles (mm) sur les sites de Zollikofen et de Winterthur/Seen entre 2011 et 2023 (source : MétéoSuisse) .) montrent que les valeurs extrêmes en 2011, 2015 et 2019 sont en corrélation avec les précipitations plus élevées ou plus faibles que la moyenne. En 2020, en revanche, il a plu plus que la moyenne en Suisse romande, alors qu'il a peu plu en Suisse orientale. Il pourrait donc y avoir un lien entre la charge en bétail et les précipitations annuelles. Une analyse plus précise tenant compte de l'emplacement des champs et de la date de récolte pourrait fournir des indications supplémentaires sur les corrélations possibles.

Tableau 5 : Précipitations annuelles (mm) sur les sites de Zollikofen et Winterthur/Seen entre 2011 et 2023 (source : MétéoSuisse) .

Année	Zollikofen	Winterthur/Lacs
2011	789	944
2012	1128	1412
2013	1113	1258
2014	1034	1219
2015	768	986
2016	1056	1313
2017	854	1077
2018	907	911
2019	999	1201
2020	1037	997
2021	1137	1233
2022	895	987
2023	1080	1190
Valeur moyenne	984	1133

Il existe également des différences significatives entre les taux de tare totale en fonction du lieu de chargement. A Beringen/SH, la tare totale moyenne était de 4,24% et à Chavornay et Cossonay de plus de 7,4% (figure 12). Les valeurs à Beringen, Marthalen et Neunkirch, dans la région frontalière de Schaffhouse/Vignoble zurichois, étaient significativement les plus basses et à Chavornay, Cossonay-Penthalaz, Delémont, Ependes, et Nyon, tous des sites de Suisse romande, significativement les plus élevées. Ces différences ne s'expliquent ni par des sols différents (dans les deux régions, il y a des sols extrêmement légers et des sols extrêmement lourds), ni par les précipitations annuelles. Il est possible que, pour ces facteurs d'influence également, une étude plus détaillée intégrant des paramètres de terrain géoréférencés et critiques en termes de temps pourrait fournir des informations sur les causes possibles.

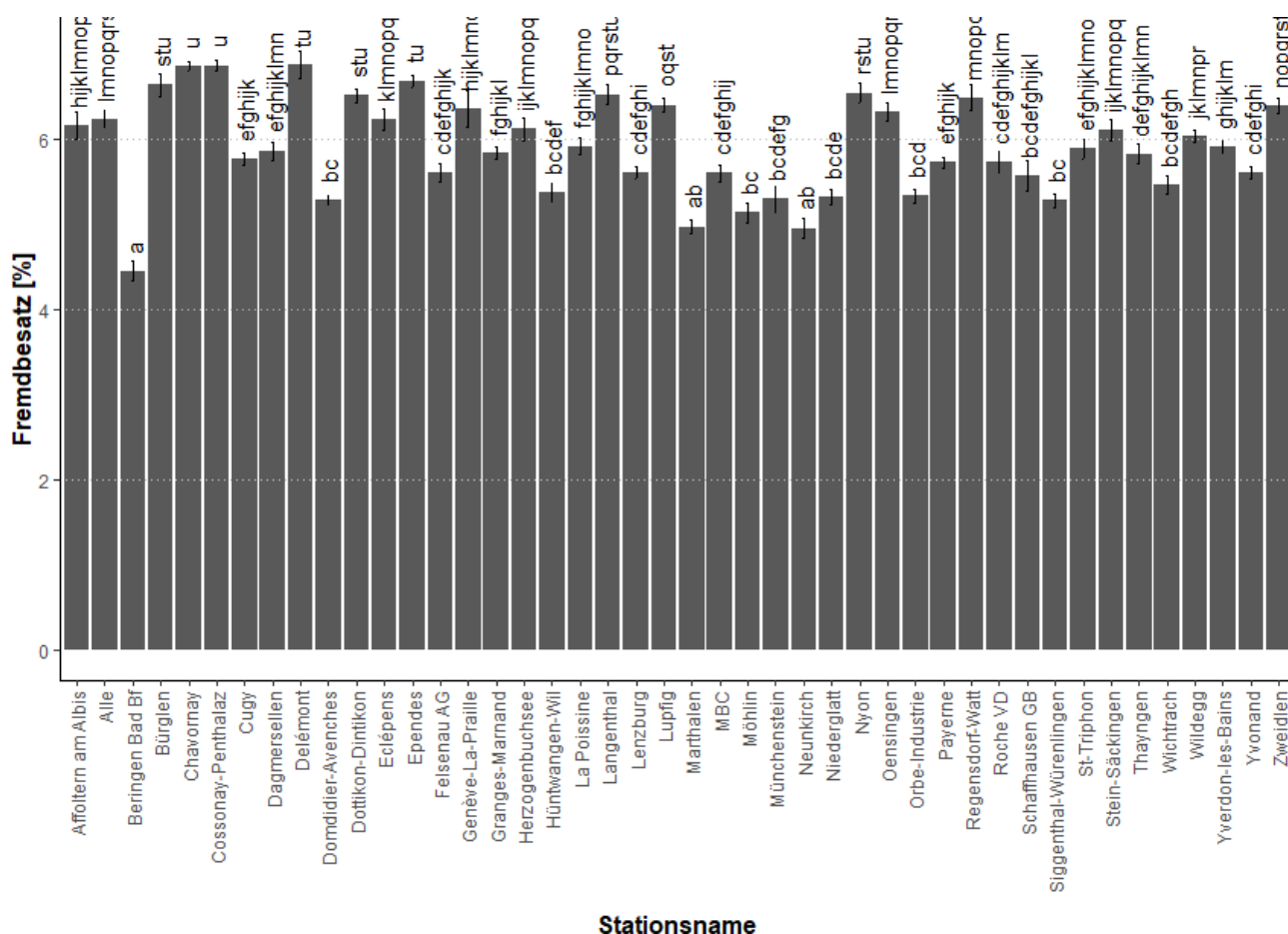


Figure 12 : Taux moyen de tare totale avec erreur standard (barre d'erreur) dans les betteraves livrées par wagons, réparties selon le lieu de chargement entre 2011 et 2023. Les moyennes avec différentes lettres diffèrent de manière statistiquement significative ($p < 0.05$).

La répartition du taux de tare totale par année des lieux de chargement de Chavornay, Cossonay-Penthalaz, Nyon et Yvonand analysés dans le cadre de cette étude confirme les observations des effets annuels moyens (figure 11), puisque les valeurs les plus basses ont été mesurées partout en 2015 et les plus élevées en 2020 (figure 13). Outre les effets annuels, les différences entre les différents lieux de chargement pourraient également s'expliquer par les systèmes de chargement (figure 14). Les valeurs moyennes obtenues après un chargement direct avec une souris de betterave, un chargement via une installation fixe avec enterreur et une rampe élevée étaient significativement plus basses que celles obtenues après un chargement par souris et un chargement via une installation fixe sans enterreur. La différence entre le chargement direct avec une souris à betteraves et le chargement stationnaire sans enterder était de 1,33 %. Comme la période d'observation était très longue, la différence entre la souris en gare et le chargement direct n'a pas pu être définie avec certitude.

A l'origine, les installations de chargement fixes de Chavornay et Cossonay-Penthalaz étaient équipées d'une dispositif de souris qui a été retiré avant la saison 2019. Depuis lors, des valeurs subjectivement plus élevées peuvent être observées par rapport à Yvonand avec un chargement par souris. Les valeurs mesurées dans les betteraves de Nyon sont le plus souvent comparables à celles de Chavornay et Cossonay-Penthalaz,

les valeurs maximales étant encore plus élevées en 2020 et 2022. Pour expliquer ces différences, il faudrait également prendre en compte les données de terrain et les données météorologiques détaillées.

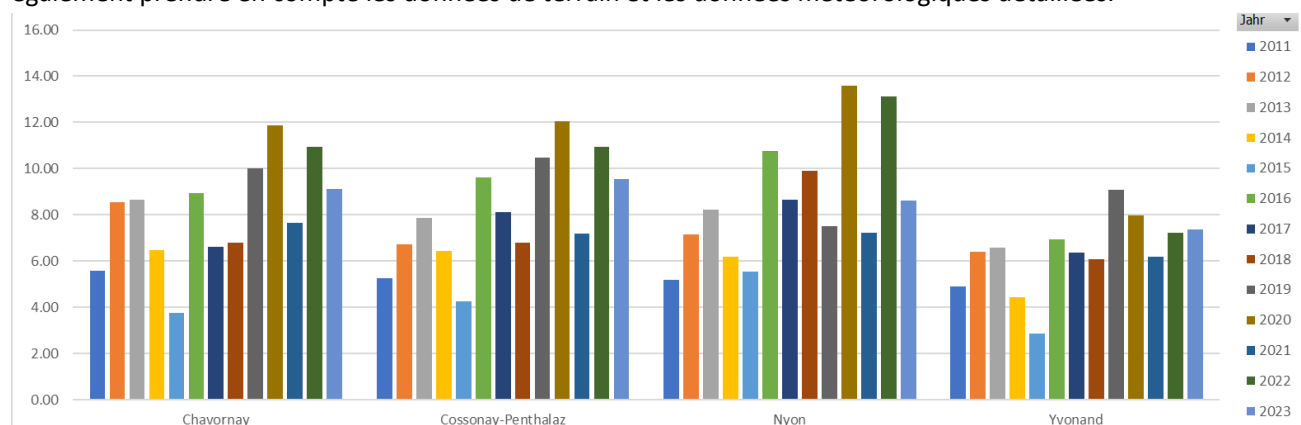


Figure 13 : Taux moyen de tare totale par année avec erreur standard (barre d'erreur) dans les betteraves livrées par wagons, réparties selon les lieux de chargement qui ont fait l'objet d'une attention particulière dans le projet entre 2011 et 2023. Les moyennes avec différentes lettres diffèrent de manière statistiquement significative ($p < 0.05$).

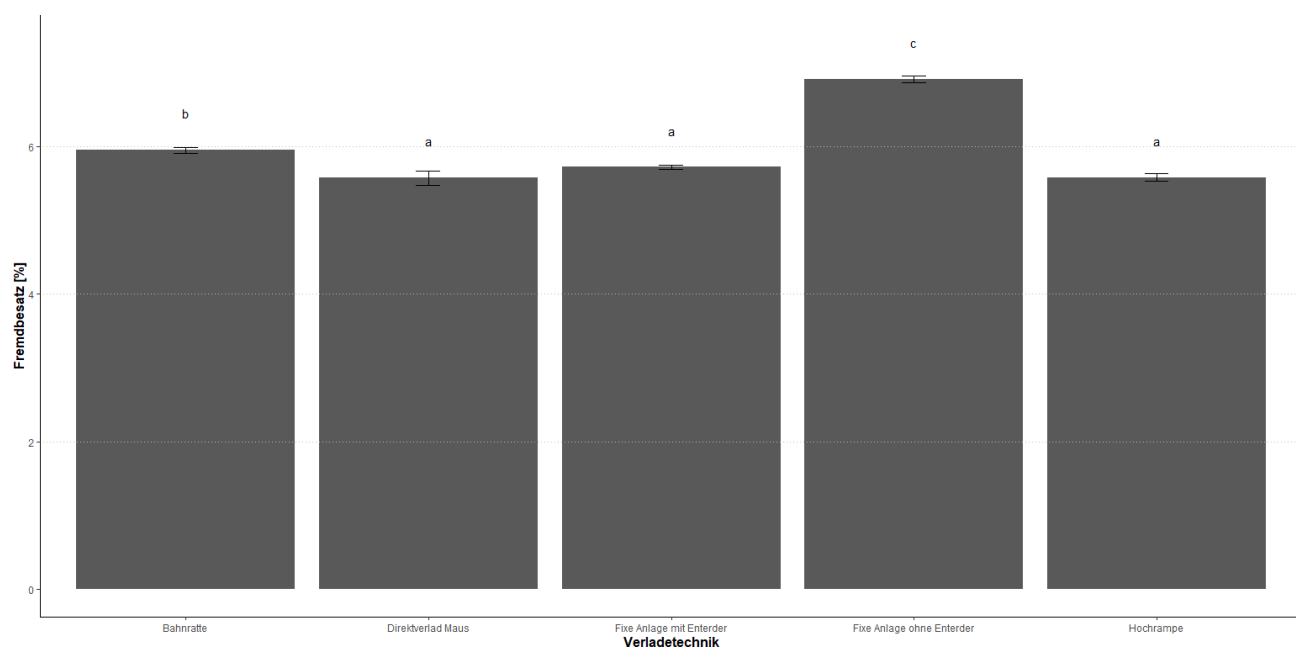


Figure 14 : Taux moyen de tare totale avec erreur standard (barre d'erreur) dans les betteraves livrées par wagons à Aarberg et Frauenfeld entre 2011 et 2023, réparties selon la technique de chargement. Les valeurs moyennes avec des lettres différentes se distinguent de manière statistiquement significative ($p < 0.05$).

La différence entre les valeurs moyennes de toutes les analyses effectuées entre 2011 et 2023, à Frauenfeld et à Aarberg, n'est que de 0,19% (figure 15). L'influence du site de l'usine sur la tare totale peut toutefois être démontrée statistiquement en raison du très grand nombre d'échantillons individuels (153 179). Compte tenu des différences beaucoup plus importantes entre les sites de chargement et les méthodes de chargement, cette différence est jugée négligeable et ne doit pas être étudiée plus avant.

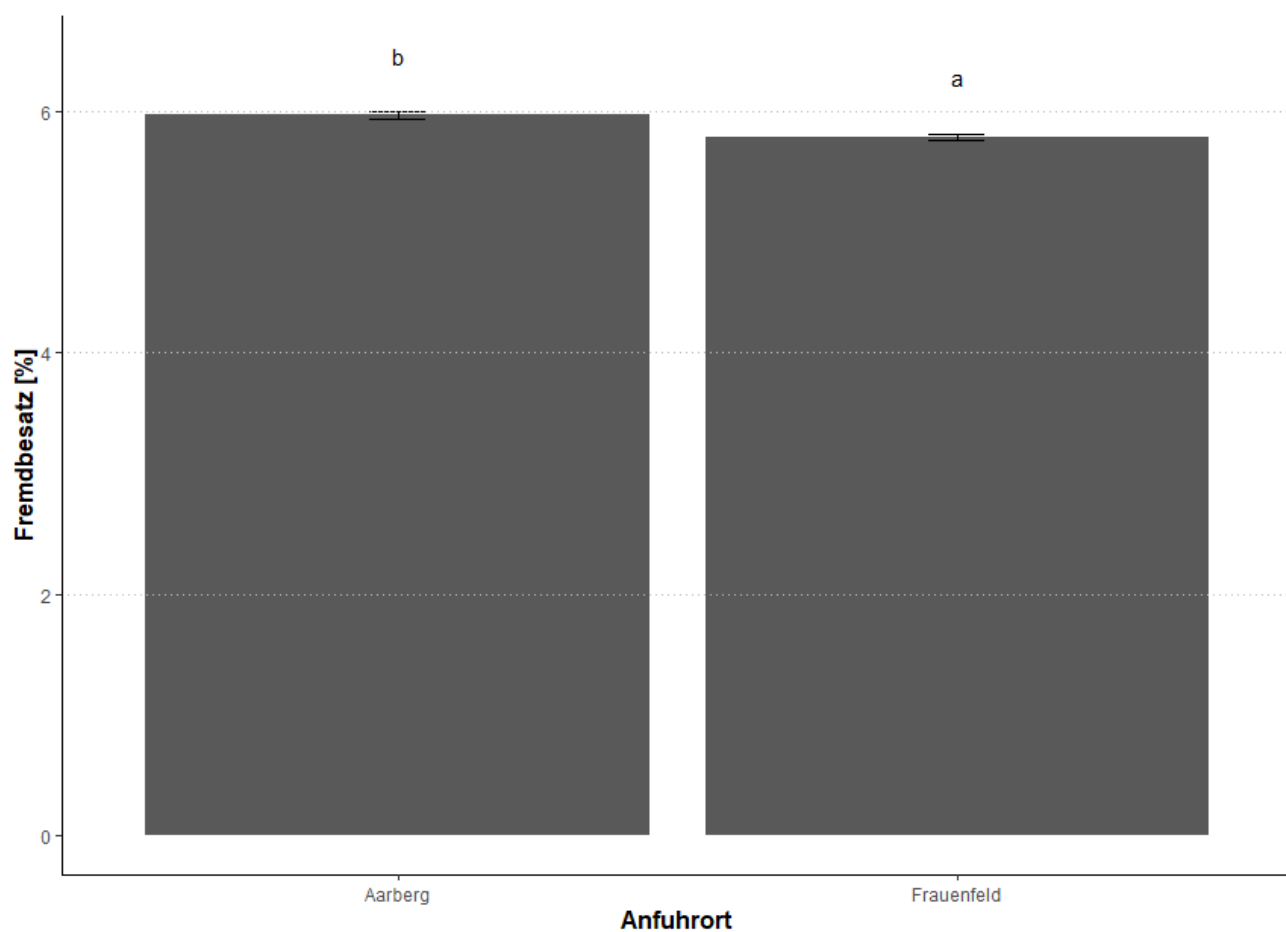


Figure 15 : Taux moyen de tare totale avec erreur standard (barre d'erreur) dans les betteraves sucrières livrées par wagons à Aarberg et Frauenfeld entre 2011 et 2023. Les valeurs moyennes avec des lettres différentes se distinguent de manière statistiquement significative ($p < 0.05$).

3.2 Examen préliminaire du prélèvement d'échantillons sur les wagons de chemin de fer avec 15 échantillons aléatoires supplémentaires

Site de chargement d'Yvonand

- Simulation de l'influence du nombre d'échantillons sur la variance et la valeur moyenne "effective" de la tare totale mesurée :

Les deux échantillons réguliers ont été prélevés automatiquement à 1/3 de la largeur du wagon (X:452, Y : 299) ainsi qu'à 2/3 de la largeur du wagon (X:359, Y : 902). Les échantillons réguliers de la livraison d'Yvonand (wagon 33) ont révélé une tare totale de 11,87 % en moyenne. Les 15 échantillons aléatoires supplémentaires ont donné une moyenne de 12.06 % de tare totale, ce qui représente une approximation plus précise de la part "effective" de tare totale dans le wagon. Ainsi, le taux de tare totale "effectif" est supérieur de 0,19 % au taux de tare totale des échantillons réguliers (figure 16).

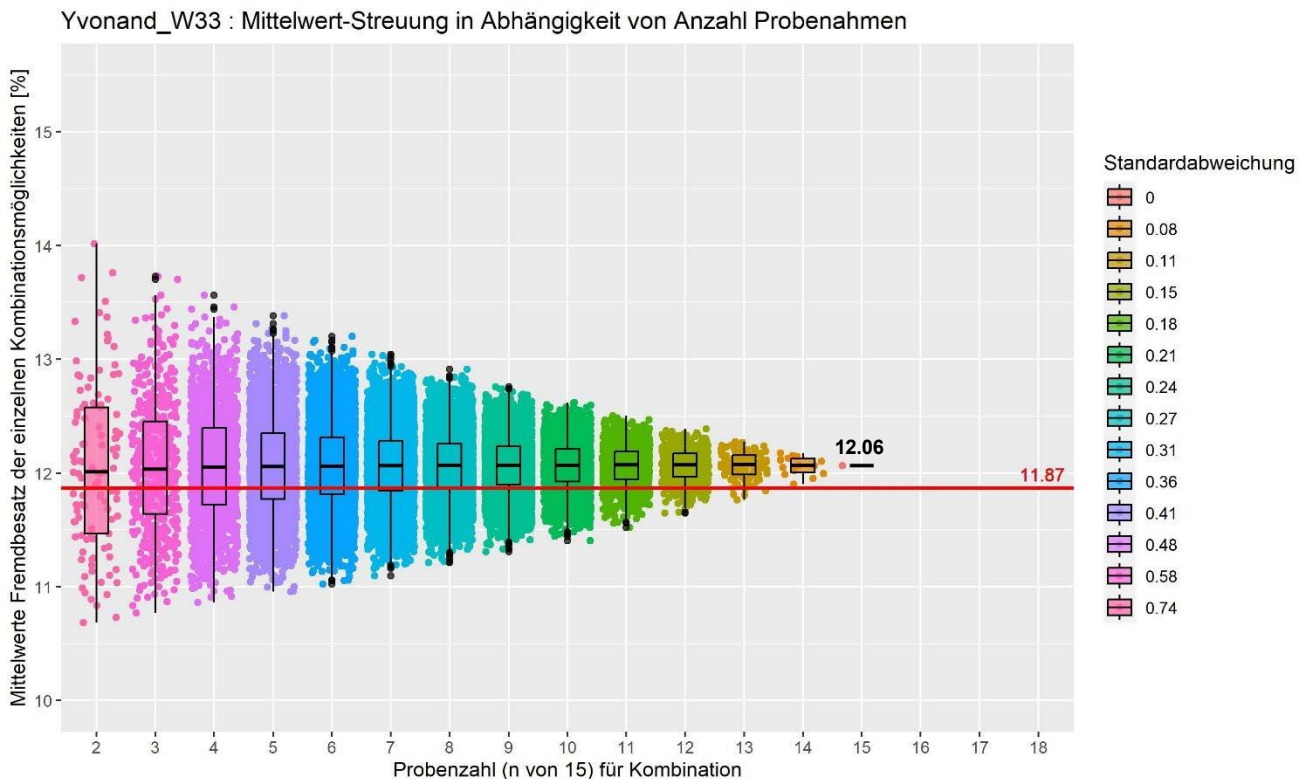


Figure 16 : Tare totale dans le wagon 33 d'Yvonand - dispersion de la valeur moyenne en fonction du nombre d'échantillons prélevés (de 2 à 15) ; représentation de la différence entre la valeur moyenne de l'échantillon normal (ligne rouge) et celle des 15 échantillons supplémentaires.

La figure 16 illustre également les modifications de la dispersion des valeurs moyennes indiquées (= part de tare totale) en fonction du nombre d'échantillons. L'écart-type est de 0,18 % pour dix échantillons, de 0,36 % pour six échantillons et de 0,74 % pour deux échantillons. La dispersion des valeurs moyennes augmente à mesure que le nombre d'échantillons utilisés diminue. Plus la dispersion augmente, plus l'écart possible entre la mesure et la proportion réelle de tare totale s'accroît. On peut observer un doublement de l'écart-type pour quatre échantillons omis.

- Vérification de l'homogénéité de la répartition des de la tare totale dans les wagons avec krigeage

La figure 17 montre la carte du wagon de chemin de fer d'Yvonand obtenue par krigeage. La répartition de la tare totale est hétérogène. Dans le tiers avant, la part de la tare totale est plus faible que dans les deux tiers arrière, où se trouve un hotspot à peu près au milieu du wagon. La proportion de tare totale a tendance à être plus élevée sur le côté gauche du wagon et à diminuer vers le côté droit. Dans le coin avant droit, il semble que la proportion de tare totale est très faible.

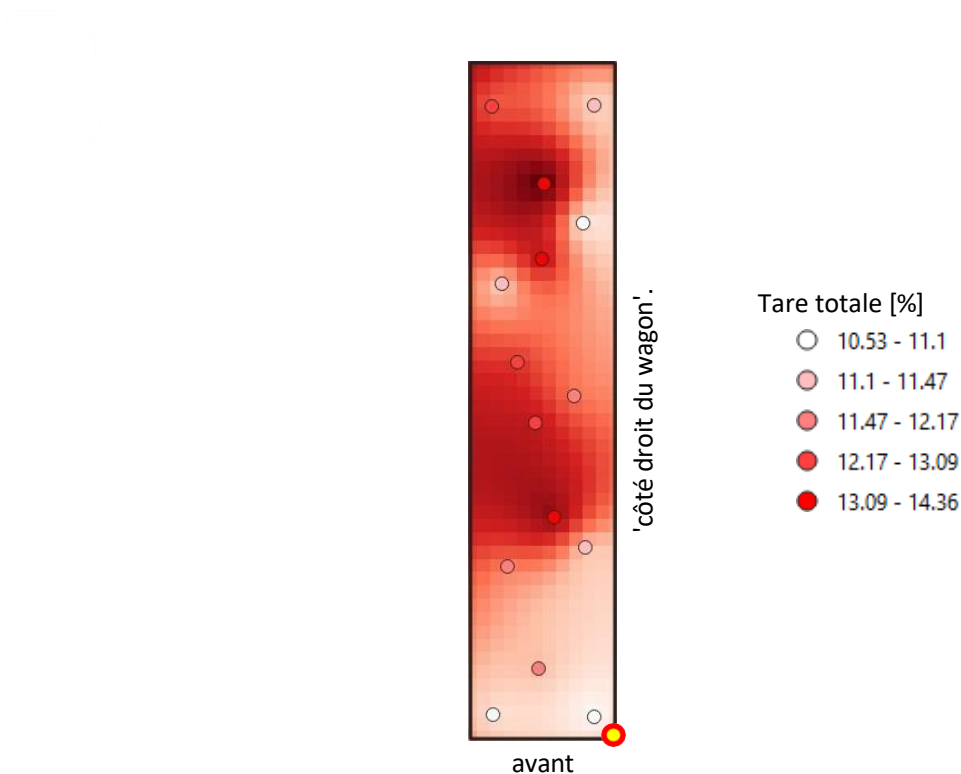


Figure 17 : Répartition de la tare totale dans le wagon d'Yvonand avec points d'échantillonnage ; point zéro (0/0) = avant droit

- Simulation du prélèvement d'échantillons par paires avec les valeurs interpolées

Sur la carte interpolée de la tare totale du wagon d'Yvonand, 240 échantillons simulés ont été prélevés - 120 sur 1/3 et 2/3 de la largeur du wagon (figure 18) et la moyenne ainsi que l'écart-type ont été calculés (tableau 5).

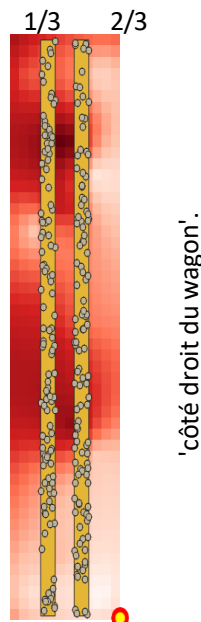


Figure 18 : Carte interpolée de la tare totale du wagon d'Yvonand, avec des zones superposées pour l'échantillonnage simulé (1/3 et 2/3 de la largeur du wagon) et des points d'échantillonnage générés aléatoirement.

Les 240 échantillons ont en moyenne 12,25 % de tare totale, ce qui, contrairement à la moyenne des échantillons réguliers (11,87 %), est supérieur aux 12,06 % de tare totale "effective" approchée (+0,19 %). L'écart-type est en moyenne de 0,76 %. Les échantillons prélevés sur 1/3 de la largeur du wagon représentent en moyenne 12,52 %, donc plus élevé que les échantillons sur 2/3 avec une valeur moyenne de 11,99%. Cela confirme également l'observation faite précédemment, à savoir que le pourcentage de tare totale est plus élevé sur le côté gauche du wagon que sur le côté droit. Les échantillons se situent dans une fourchette de 10,79 % à 13,87 %, la valeur la plus élevée ayant été mesurée sur 1/3 et la plus basse sur 2/3.

Tableau 6 : Liste de la moyenne, de l'écart-type, de la valeur min. et max. du prélèvement simulé d'Yvonand [%].

	Aperçu 240 échantillons	Échantillons 1/3	Échantillons 2/3
Moyenne [%]	12.25	12.52	11.99
Écart-type [%]	0.76	0.80	0.63
Min [%]	10.79	11.03	10.79
Max [%]	13.87	13.87	13.32

Site de chargement de Cavornay

- Simulation avec un nombre réduit d'échantillons et évaluation descriptive des valeurs de simulation :

Les deux échantillons réguliers de la livraison de Chavornay (wagon 31) ont été prélevés aux mêmes coordonnées que dans le wagon d'Yvonand. Ils ont donné une moyenne de 9,23% de tare totale. Les 15 échantillons supplémentaires prélevés au hasard ont donné une moyenne de 7,96 % de tare totale. Contrairement à la livraison d'Yvonand, les échantillons réguliers de cette livraison spécifique ont donné une valeur d'impureté supérieure de 1,27 % à l'impureté "effective". Comme pour l'échantillonnage du wagon d'Yvonand, l'écart-type augmente également avec la réduction du nombre d'échantillons. Pour dix échantillons, il est de 0,31 %, pour six échantillons de 0,54 % et pour deux échantillons de 1,13 %. L'augmentation est similaire à celle de la livraison d'Yvonand et double environ tous les quatre échantillons omis (figure 19).

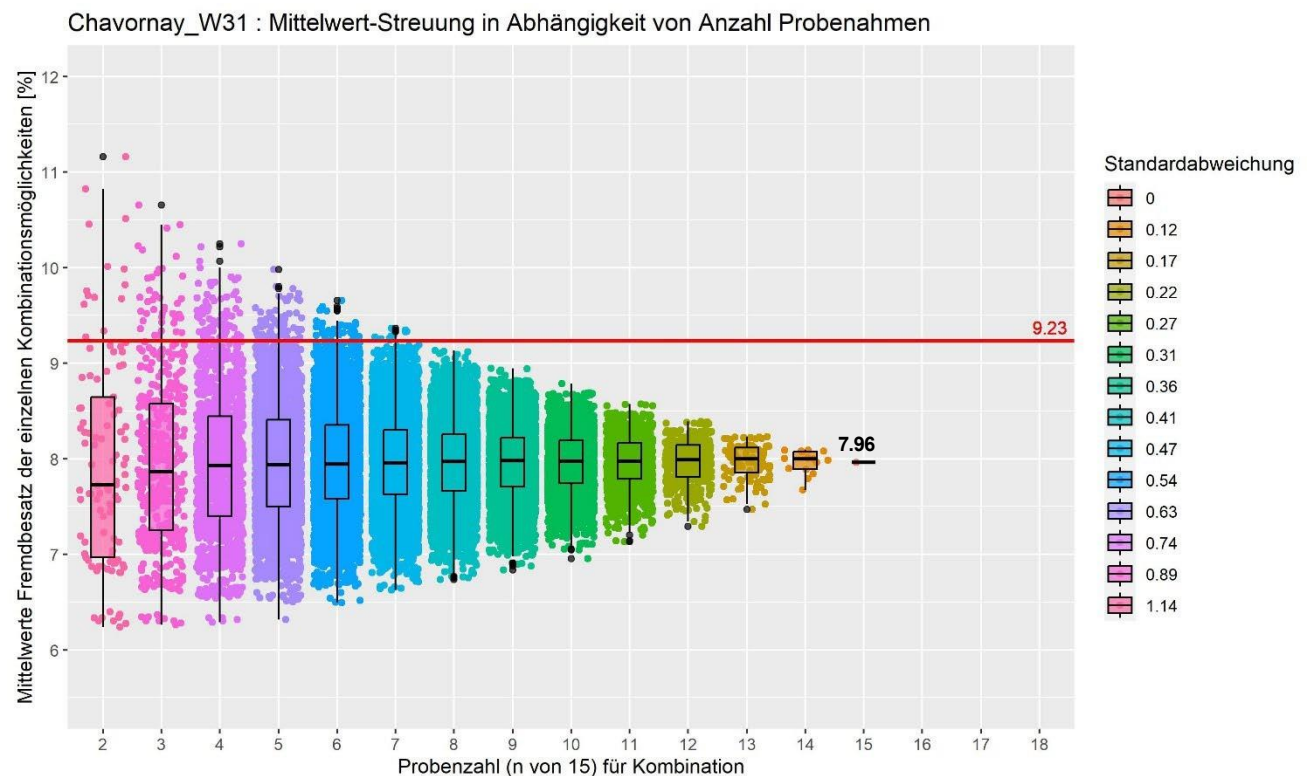


Figure 19 : Tare totale dans le wagon 31 de Chavornay - dispersion de la valeur moyenne en fonction du nombre d'échantillons prélevés (de 2 à 15 échantillons) ; représentation de la différence entre la valeur moyenne de l'échantillon normal (ligne rouge) et celle des 15 échantillons supplémentaires.

- Vérification de l'homogénéité de la répartition de la tare totale dans le wagon de chemin de fer avec krigeage :

La figure 20 montre la répartition de la tare totale dans le wagon de Chavornay, qui est également hétérogène. C'est dans le tiers central du wagon que la tare totale est la plus élevée, avec un hotspot à mi-largeur. La tare totale diminue à nouveau quelque peu vers l'arrière, le côté droit du wagon étant plus encombré que le côté gauche. Le tiers avant présente la plus faible proportion de tare totale.

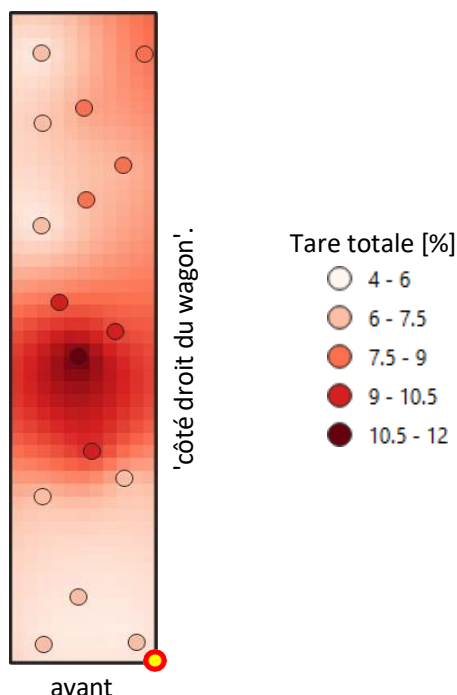


Figure 20 : Répartition de la tare totale dans le wagon de Chavornay avec points d'échantillonnage ; point zéro (0/0) = avant droit

- Simulation du prélèvement d'échantillons par paires avec les valeurs interpolées

Un prélèvement par paire de 120 échantillons sur 1/3 et 2/3 de la largeur du wagon a également été simulé pour la livraison de Chavornay (illustration 21).

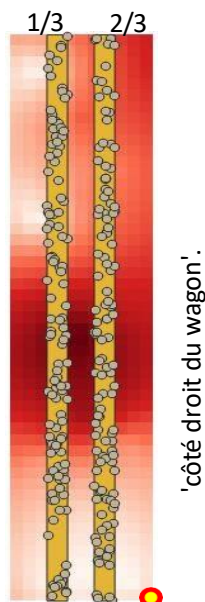


Figure 21 : Carte interpolée de la tare totale du wagon de Chavornay, avec des zones superposées pour l'échantillonnage simulé (1/3 et 2/3 de la largeur du wagon) et des points d'échantillonnage générés aléatoirement

Les 240 échantillons ont en moyenne 8,16 % de tare totale, ce qui, comme la valeur moyenne des échantillons réguliers (9,23 %) est supérieur aux 7,96 % de la tare totale "effective" approchée (+0,2 %) (tableau 7). L'écart-type est en moyenne de 1,51 %. Les échantillons prélevés sur 1/3 de la largeur du wagon ont une moyenne de 8.07 %, ce qui est plus bas que les échantillons prélevés sur 2/3, dont la moyenne est de 8.24 %. L'observation faite précédemment, à savoir que la proportion de tare totale est plus élevée sur le côté droit du wagon, se confirme donc ici aussi. Les échantillons se situent dans une fourchette de 6.31 % à 11.69 %, la valeur la plus élevée ayant été mesurée sur 1/3 et la plus basse sur 2/3.

Tableau 7 : Liste de la moyenne, de l'écart-type, de la valeur min. et max. du prélèvement simulé de Chavornay [%].

	Aperçu 240 échantillons	Échantillons 1/3	Échantillons 2/3
Moyenne [%]	8.16	8.07	8.24
Écart-type [%]	1.51	1.61	1.40
Min [%]	6.31	6.33	6.31
Max [%]	11.69	11.69	11.26

Pour la livraison d'Yvonand, le taux de tare totale en appliquant le prélèvement régulier était inférieur au taux de tare totale approximatif "effectif" (-0.19 %), mais pour la livraison de Chavornay, ce taux était supérieur (+1.27 %). Cela montre qu'il peut y avoir des écarts importants dans la tare totale des prélèvements réguliers par rapport à la tare totale "effective", écarts qui peuvent être au détriment du producteur et de Sucre Suisse SA. La simulation des 240 échantillons appariés a cependant aussi montré que cet état de fait persiste, indépendamment du point auquel les échantillons sont prélevés à 1/3 et 2/3 de la largeur du wagon. A Yvonand, l'écart-type pour les échantillons sur toute la longueur du wagon est de 0,76 %, à Chavornay même de 1,51 %. La dispersion lors du prélèvement d'échantillons selon le schéma du catalogue des méthodes est nettement plus importante pour la livraison de Chavornay que pour celle d'Yvonand.

Ces écarts-types élevés sont dus à la répartition très hétérogène de la tare totale dans les wagons, la répartition des valeurs de la tare totale étant nettement plus hétérogène dans le wagon de Chavornay que dans celui d'Yvonand. Pour les deux livraisons, la tare totale est la plus faible dans le tiers avant du wagon et les deux livraisons présentent un hotspot dans le tiers central ainsi qu'un enrichissement de la tare totale sur un côté du wagon (Chavornay : à droite ; Yvonand : à gauche). Cela pourrait être dû au type, à l'emplacement et à l'orientation du système de chargement.

3.3 Examen préliminaire du prélèvement d'échantillons sur les wagons de chemin de fer avec 15 échantillons aléatoires supplémentaires

Les résultats de l'analyse principale de trois livraisons de Nyon, Chavornay et Cossonay sont représentés

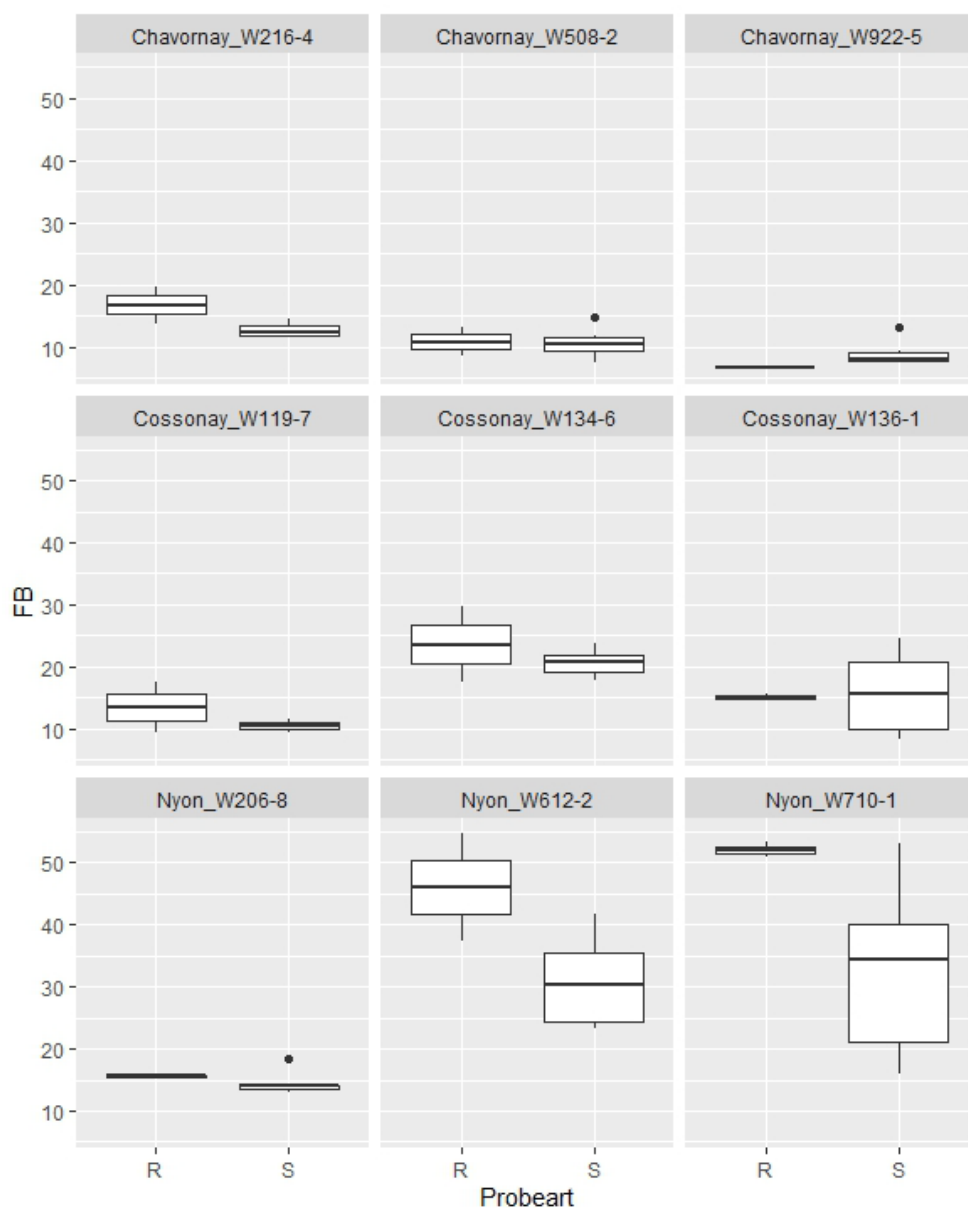


Figure 22 : Comparaison du taux de tare totale en fonction du type d'échantillon pour chaque wagon échantillonné (R = échantillons réguliers ; S = échantillons supplémentaires (tare totale "effectives"))

Les valeurs moyennes des échantillons réguliers présentaient pour toutes les livraisons une différence par rapport à la valeur moyenne du taux de tare totale "effectif" des livraisons obtenue grâce aux six échantillons supplémentaires. La différence la plus importante a été constatée pour l'échantillon régulier de la livraison W710-1 de Nyon, qui était supérieur de + 19,23 % à la valeur de référence.

le taux de tare totale "effectif". La plus petite différence par rapport au taux de tare totale "effectif" de + 0.07 % a été obtenue par l'échantillon régulier pour la livraison W508-2 de Chavornay. La différence moyenne entre la valeur moyenne des échantillons réguliers et la valeur moyenne du taux de tare totale "effectif" est de + 11.9 % pour les livraisons de Nyon, de + 0.6 % pour Chavornay et de + 1.8 % pour Cossonay. Pour les livraisons de Chavornay et de Cossonay, l'échantillon régulier présentait un taux de tare totale plus faible pour l'une des trois livraisons.

Tableau 8 : Aperçu des résultats de l'enquête principale avec six échantillons supplémentaires, classés selon l'origine des livraisons.

Nyon Chargement : souris					
N° de waggon	Moyenne des échantillons réguliers [%]	Valeur moyenne supplémentaire [%]	Différence rég. - suppl. [%]	SD, supplémentaire [%]	Date Échantillon
W612-2	46.10	30.86	15.24	7.55	14.12.2023
W710-1	51.98	32.75	19.23	14.30	
W206-8	15.65	14.42	1.24	2.02	
Ø			11.90		

Chavornay Chargement : stationnaire					
N° de voiture	Moyenne des échantillons rég. [%]	Valeur moyenne. supplé- mentaire [%]	Différence rég. - suppl. [%]	SD supplé- mentaire [%]	Date Échantillon
W216-4	16.69	12.69	4.00	1.27	19.12.2023
W508-2	10.79	10.72	0.07	2.50	
W922-5	6.65	8.91	-2.26	2.12	
Ø			0.60		

Cossonay Chargement : stationnaire					
N° de voiture	Moyenne des échantillons rég. [%]	Valeur moyenne. supplé- mentaire [%]	Différence rég. - suppl. [%]	SD supplé- mentaire [%]	Date Échantillon
W119-7	13.50	10.45	3.05	0.79	20.12.2023
W136-1	15.14	15.72	-0.57	6.75	
W134-6	23.62	20.63	2.99	2.23	
Ø			1.82		

Résumé	différence max :	19.23 % (Nyon_W710-1)
	min. différence :	0,07 % (Chavornay_W508-2)
	FB reg. échantillon < FB- "effectif	22%
	FB reg. échantillon > FB- "effectif	78%

Les livraisons W612-2 et W-710-1 de Nyon présentent, par rapport aux autres livraisons, non seulement des différences plus importantes dans le taux de tare totale entre les échantillons réguliers et supplémentaires, mais aussi un taux de tare totale plus élevé et un écart-type plus important (écart-type jusqu'à 14,3 %) des échantillons supplémentaires (voir figure 22 et tableau 8).

L'analyse statistique au moyen d'un modèle linéaire mixte montre des effets significatifs du lieu et du type d'échantillon (régulier vs supplémentaire) ainsi que leur interaction sur le taux de tare totale. Ainsi, des différences significatives ont été constatées entre les livraisons des différentes localités, avec un taux de tare totale spécifiquement et significativement plus élevé dans les livraisons de Nyon par rapport à Chavornay ($p < 0.05$, $df = 8.55$, valeur t pour Nyon vs. Chavornay = 3.513). De plus, l'analyse montre que les échantillons réguliers de Nyon présentent un taux de tare totale significativement plus élevé que le taux de tare totale "effectif" déterminé par les échantillons

supplémentaires ($p < 0.05$, $df = 59.01$ pour Nyon, valeur $t = 2.781$ pour R Nyon vs S Nyon). Les intervalles de confiance soutiennent ces résultats et offrent un aperçu supplémentaire de la précision des estimations, avec des intervalles de confiance pour la comparaison entre les échantillons réguliers et la tare totale "effective" à Nyon de 1.419 (IC 95% : 19.57 à 56.6) sur l'échelle initiale. Les différences entre les échantillons réguliers et la tare totale "effective" pour les livraisons de Chavornay et Cossonay ne sont pas significatives. L'analyse statistique est représentée graphiquement dans la figure 23.

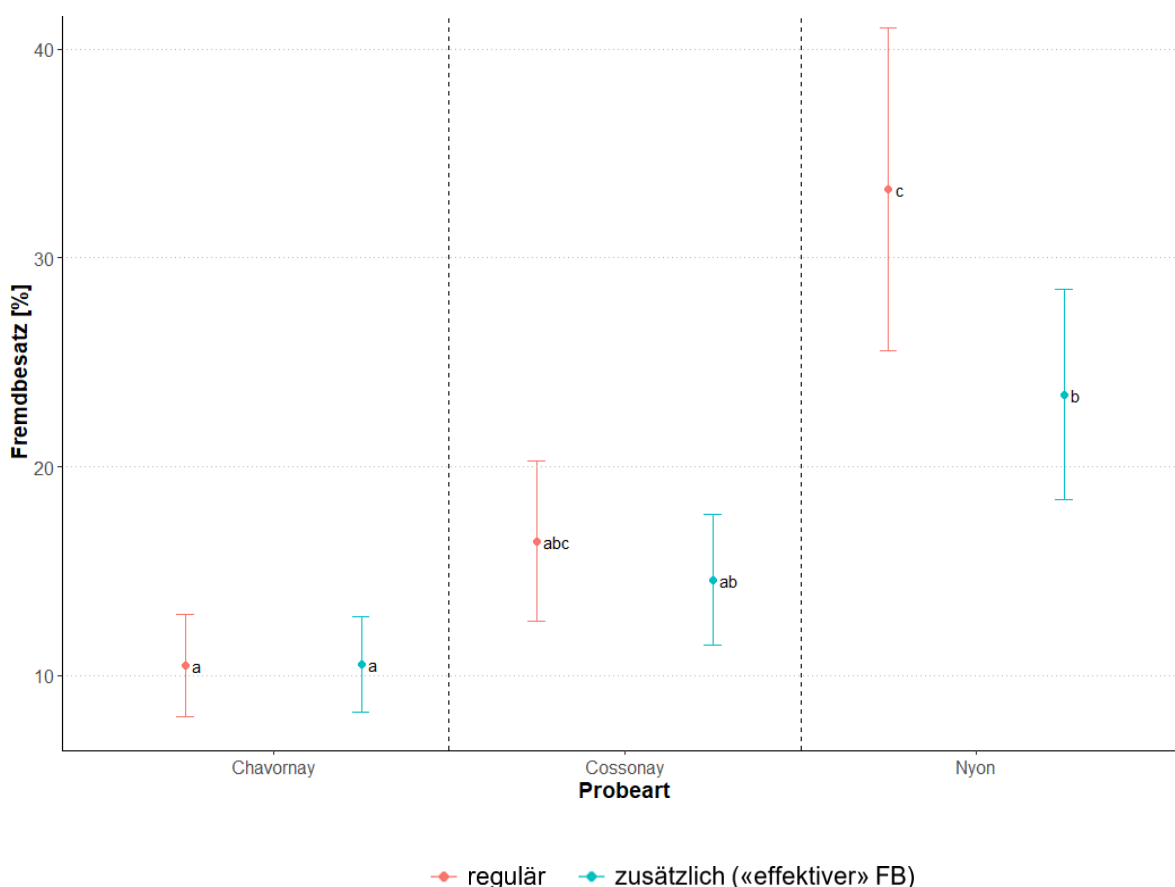


Figure 23 : Résultats du relevé de la tare totale en fonction du type d'échantillon et de la provenance.

La différence significative entre les types d'échantillons à Nyon ainsi que la différence dans la hauteur du taux de tare totale de Nyon par rapport aux deux autres sites est ici principalement due aux deux livraisons W612-2 et W710-1 de Nyon (cf. fig. 15 et tableau 7).

Contrairement aux sites de Chavornay et Cossonay, les échantillons réguliers ont donné pour les livraisons de Nyon des valeurs qui sont en moyenne significativement supérieures au taux de tare totale "effectif" (+ 11,9 %, $p < 0,05$). Comme nous l'avons déjà mentionné dans le *chapitre 8 Résultats de l'étude principale avec six échantillons supplémentaires*, cette significativité est toutefois principalement due aux livraisons W612-2 et W710-1 de Nyon, qui sont remarquables à trois égards. Plusieurs raisons peuvent être envisagées pour expliquer le taux de tare totale inhabituellement élevé de ces deux livraisons. Par exemple, les conditions météorologiques pendant la récolte, le processus de récolte, le stockage et le transport, ainsi que le mode de chargement peuvent avoir une influence sur le taux de tare totale dans la livraison ferroviaire. Pour les deux livraisons mentionnées, les échantillons supplémentaires présentent une très grande dispersion (W612-2 = 7.55 % et W710-1 = 14.30 %) des échantillons supplémentaires, ce qui permet de conclure à une répartition très hétérogène de la tare totale à l'intérieur du wagon de chemin de fer. Au vu de ces données, la répartition de la tare totale dans les wagons semble donc avoir une influence directe sur les écarts entre les prélèvements réguliers et l'échantillon de référence.

Dans le cadre de l'enquête principale, la répartition moyenne de la tare au sein des wagons est plus hétérogène pour les livraisons de Nyon que pour les livraisons de Chavornay et Cossonay. Contrairement à Chavornay et Cossonay, qui disposent d'une rampe stationnaire, les wagons de Nyon sont chargés au moyen d'une souris. Par conséquent, les paramètres semblent être répartis de manière légèrement plus homogène au sein des wagons avec des installations fixes que lors du chargement avec la souris. Toutefois, il faut également tenir compte

il faut mentionner que cela n'a pas été le cas pour toutes les livraisons analysées, comme le montre la livraison W136-1 de Cossonay ou les prélèvements de l'étude préliminaire. On constate néanmoins une tendance à des chargements plus homogènes au moyen d'une installation stationnaire. Cet effet peut éventuellement être renforcé par des taux de tare totale très élevés dans les livraisons, comme c'est le cas pour W612-2 et W710-1.

4 Conclusions

4.1 Facteurs d'influence sur la tare totale sur la base des analyses des données de 2011 à 2023

Sur la base de l'étude des taux de tare totale dans les livraisons de betteraves sucrières réalisée entre 2011 et 2023, il est possible de tirer quelques conclusions essentielles. Tout d'abord, il s'est avéré que le taux de tare totale est influencé de manière significative par des facteurs tels que le mois de livraison, l'année de livraison, le lieu de chargement et le site de l'usine. L'augmentation mensuelle des taux de tare totale, en particulier en automne, indique que les influences extérieures, telles que l'augmentation de l'humidité du sol, jouent un rôle. Les différences entre les lieux de chargement, notamment dans la région frontalière avec la Suisse romande, laissent supposer que les conditions géographiques et infrastructurelles constituent un autre facteur d'influence.

Afin de mieux comprendre les causes de la tare totale et de la minimiser de manière ciblée, il est nécessaire de procéder à de futures analyses qui tiennent compte non seulement des données météorologiques, mais aussi des paramètres de terrain spécifiques et des données géoréférencées. Les effets de différents systèmes de chargement, notamment la comparaison entre les installations directes et les installations fixes, pourraient également fournir des informations supplémentaires. Les installations de chargement de Cossonay-Penthalaz et de Chavornay devraient faire l'objet d'une attention particulière, respectivement d'une adaptation, dans la mesure où les enterreurs ont été retirés et les bandes de tamisage remplacées par des bandes en caoutchouc, afin que la tare séparée à la gare ne soit pas éliminée sur place, mais dans les règles de l'art à l'usine. De même, il n'est pas exclu que la profondeur de travail des organes de ramassage sur les campagnols des betteraves puisse entraîner un apport supplémentaire de terre - surtout si l'emplacement du tas de betteraves est inégal. Les mesures individuelles, compréhensibles dans le sens d'une protection phytosanitaire préventive, d'un déroulement efficace du travail et d'un ramassage propre des tas de betteraves, peuvent donc conduire à une augmentation supplémentaire involontaire de la charge en tare totale.

L'influence d'autres paramètres tels que le type de sol, l'humidité du sol lors de la récolte ou le système de culture pourrait être analysée dans une étape ultérieure en intégrant les données exactes et géoréférencées du champ. Les données nécessaires à cet effet seraient en fait disponibles.

4.2 Examen préliminaire du prélèvement d'échantillons sur les wagons de chemin de fer avec 15 échantillons aléatoires supplémentaires

Les analyses ont clairement montré que la tare totale est répartie de manière hétérogène au sein des wagons. Avec un échantillon de seulement 2 wagons pour la validation de la méthode de l'enquête sur la tare totale, il est toutefois difficile de tirer des conclusions pertinentes sur l'influence du système de chargement sur l'hétérogénéité dans les livraisons. Il n'est pas non plus certain que la répartition de la tare totale dans les livraisons analysées soit représentative d'autres livraisons d'Yvonand et de Chavornay. Il faudrait en fait analyser d'autres livraisons pour évaluer si le prélèvement régulier d'échantillons après l'arrivée de la livraison est représentatif. Cependant, pour des raisons de ressources, cela doit se faire avec moins d'échantillons par analyse. En supposant qu'un écart-type de 0,5 % est acceptable, le nombre d'échantillons peut être réduit. Pour la livraison d'Yvonand, l'écart-type pour quatre échantillons correspond à 0,48 %. Pour la livraison de Chavornay, l'écart-type est de 0,54 % pour six échantillons. C'est pourquoi six échantillons supplémentaires sont proposés pour des analyses supplémentaires, qui peuvent être comparés aux deux échantillons réguliers.

4.3 Examen principal avec six échantillons supplémentaires

Au cours de cette enquête, il a été constaté qu'entre les prélèvements réguliers et le "effective" de la tare totale, des écarts positifs et négatifs sont apparus. Il s'est avéré que ces écarts n'étaient généralement pas statistiquement significatifs et donc pas systématiques. L'étude principale a donc montré que les deux échantillons réguliers sont tout à fait représentatifs de la tare totale "effective" et que des échantillons supplémentaires ne donneraient pas nécessairement des résultats plus précis.

Les études suggèrent que la distribution de la tare totale a une influence directe sur les écarts observés et que la représentativité des échantillons réguliers semble augmenter avec l'homogénéité de la distribution de la tare au sein du wagon de chemin de fer. Dans ce contexte, la distribution des paramètres semble être légèrement plus homogène lors du chargement avec des installations fixes que lors du chargement avec une souris, ce qui indique des différences d'efficacité des méthodes de chargement. Afin d'améliorer encore la fiabilité des échantillons réguliers, les recommandations suivantes peuvent être faites :

1. Augmenter le nombre d'échantillons réguliers : Cela pourrait contribuer à réduire la dispersion des échantillons. Il faut toutefois garder à l'esprit qu'une augmentation du nombre d'échantillons entraîne un allongement du temps de traitement des livraisons à leur arrivée à la sucrerie et, par conséquent, des coûts supplémentaires. Une alternative consisterait à prélever un troisième échantillon de manière sporadique sur des wagons choisis au préalable et de manière aléatoire afin de vérifier la répartition des données.
2. Prendre des mesures pour réduire l'hétérogénéité du chargement externe dans les wagons. Pour ce faire, il est recommandé d'analyser plus en détail les différentes méthodes de chargement et leur influence sur la répartition de la tare totale dans les wagons. De plus, l'influence d'autres facteurs sur la tare totale - comme les conditions météorologiques pendant la récolte, les méthodes de récolte, les informations sur la parcelle de culture, le stockage, le transport et le chargement lui-même - devrait être étudiée en détail.
3. Lors du ramassage des tas de betteraves dans les champs, il faut veiller à ce que les organes de ramassage travaillent le plus à plat possible. Cela implique un guidage précis de la machine et la pose du tas sur un terrain aussi plat que possible. Cela devrait permettre de réduire les éventuelles salissures supplémentaires des betteraves.
4. Amélioration de l'analyse mathématique des valeurs aberrantes ou de l'identification des écarts inexplicables lors de la livraison - dans le spectre aussi bien contre les valeurs faibles que les valeurs élevées.
5. Aide à l'identification des non-conformités grâce à des systèmes de caméras installés dans la chaîne d'échantillonnage (par exemple, lors du prélèvement, avant le lavage et après le tri fin).
6. Relier la chaîne de transport dans le but d'améliorer la traçabilité et d'exclure les erreurs systématiques concernant le lieu de chargement, le moment de chargement et le producteur.

5 Bibliographie

- Groupe Alpiq (éd.) (2017) : Nouvelle technique de commande d'Alpiq pour les sucreries. Disponible en ligne sur <https://www.alpiq.ch/alpiq-gruppe/medien/news-stories/news-stories-detail/new-control-technology-from-alpiq-for-sugar-refineries>, dernière vérification le 08.12.2023.
- Auguie, Baptiste (2017) : gridExtra : Fonctions diverses pour les graphiques "Grid". Version R packages version 2.3. Disponible en ligne sur <https://cran.r-project.org/web/packages/gridExtra/index.html>.
- Bärwolff, Günter (2016) : Numeric for engineers, physicians and informaticers. 2ème éd. 2016. Berlin, Heidelberg : Springer Spektrum (Livres SpringerLink).
- Benndorf, Jörg (2023) : Analyse et modélisation appliquées des données géographiques. Une introduction à la géostatistique pour les géoscientifiques et les géo-ingénieurs. Wiesbaden : Springer Vieweg.
- Erdin, Daniel (2022) : Agristat Actualités 08-22 : Estimation des terres arables suisses en 2022. éd. par Agristat.
- Fahrmeir, Ludwig ; Heumann, Christian ; Künstler, Rita ; Pigeot, Iris ; Tutz, Gerhard (2016) : Statistiques. Le chemin vers la
Analyse des données. 8e éd. 2016. Berlin, Heidelberg : Springer (Springer-Lehrbuch).
- Faik, Jürgen (2015) : Statistiques Pour les économistes et les sociologues. Comprendre, apprendre, s'exercer. 1st ed. Berlin : John Wiley & Sons Incorporated.
- Graves, Spencer ; Piepho, Hans-Peter ; Selzer, Luciano ; Dorai-Raj, Sundar (2019) : multcompView : Visualizations of Paired Comparisons. Version R package version 0.1-8. Disponible en ligne sur <https://cran.r-project.org/web/packages/multcompView/index.html>.
- Kassambara, Alboukadel (2020) : ggpubr : 'ggplot2' Based Publication Ready Plots. Version R version package 0.4.0. Disponible en ligne à l'adresse <https://cran.r-project.org/web/packages/ggpubr/index.html>.
- Kuznetsova, Alexandra ; Brockhoff, Per B. ; Christensen, Rune H. B. (2017) : lmerTest Package : Tests dans les modèles à effets mixtes linéaires.
- Lenth, Russell (2020) : emmeans : Estimated Marginal Means, aka Least-Squares Means. Version R package version 1.4.8. Disponible en ligne sur <https://CRAN.R-project.org/package=emmeans>.
- Lüdecke, Daniel (2021b) : sjlabelled : Fonctions utilitaires de données étiquetées. Version R package version 1.1.8. Disponible en ligne à l'adresse <https://CRAN.R-project.org/package=sjlabelled>.
- Lüdecke, Daniel (2021a) : sjPlot : Data Visualization for Statistics in Social Science. Version R package version 2.8.9. Disponible en ligne à l'adresse <https://cran.r-project.org/web/packages/sjPlot/index.html>.
- Lüdecke, Daniel (2018) : sjmisc : Data and Variable Transformation Functions. In : *JOSS* 3 (26), p. 754. DOI : 10.21105/joss.00754.
- Olaya, Víctor (2023) : QGIS Python Plugins Repository - Processing Saga NextGen Provider. Version 1.0.0 : North Road.
- Ooms, Jeroen (2024) : writexl : Exportation de cadres de données au format Excel 'xlsx'. Version R package version 1.5.0.
Disponible en ligne sur <https://cran.r-project.org/web/packages/writexl/index.html>.
- Pedersen, Thomas Lin (2024) : patchwork : The Composer of Plots. Version R packages version 1.2.0. Disponible en ligne sur <https://cran.r-project.org/web/packages/patchwork/index.html>.
- Schauberger, Philipp ; Walker, Alexander (2023) : openxlsx : Read, Write and Edit xlsx Files. Version R package version 4.2.5.2. Disponible en ligne à l'adresse <https://cran.r-project.org/web/packages/openxlsx/index.html>.
- Sucre Suisse SA (SZU) (éd.) (2022) : Statistiques betteraves sucrières 2022.
- Sucre Suisse SA (SZU) (éd.) (2023) : Zuckerrüben-Anbau / Culture des betteraves sucrières 2023. Schweizer Sucre SA (SZU) ; Suisse Fédération suisse des betteraviers de l'association Planteurs de betteraves sucrières (SVZ) (2022) : Catalogue des méthodes (version courte) pour la prise en charge et l'analyse des betteraves par Sucre Suisse SA. Habsbourg, 07.07.2022.

- Ushey, Kevin ; Allaire, JJ ; Wickham, Hadley ; Ritchie, Gary (2023) : rstudioapi : Safely Access the RStudio API. Version R packages version 0.15.0. En ligne disponible à l'adresse <https://cran.rstudio.com/web/packages/rstudioapi/index.html>.
- Walz, Guido (2020) : Interpolation de données et de fonctions. Texte clair pour les non-mathématiciens. Wiesbaden, Allemagne : Springer Spektrum.
- Webster, R. (2007) : Geostatistics for environmental scientists (Géostatistique pour les scientifiques de l'environnement). Avec la collaboration de M. A. Oliver. 2nd ed. Chichester : Wiley (Statistics in practice).
- Wickham, Hadley (2016) : ggplot2. Des graphiques élégants pour l'analyse de données. Avec la collaboration de Carson Sievert. Deuxième édition. Cham : Springer international publishing (Use R !). Disponible en ligne à l'adresse <https://ebookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=4546676>.
- Wickham, Hadley ; Averick, Mara ; Bryan, Jennifer ; Chang, Winston ; McGowan, Lucy ; François, Romain et al. (2019) : Bienvenue dans le Tidyverse. In : *JOSS* 4 (43), p. 1686. DOI : 10.21105/joss.01686.
- Wickham, Hadley ; Bryan, Jennifer (2023) : readxl : Read Excel Files. Version R package version 1.4.3. Disponible en ligne à l'adresse <https://cran.r-project.org/web/packages/readxl/index.html>.
- Wickham, Hadley ; François, Romain (2023) : dplyr : A Grammar of Data Manipulation. Version R package version 1.1.4. Disponible en ligne à l'adresse <https://cran.r-project.org/web/packages/dplyr/index.html>.