

MODÉLISATION MATHÉMATIQUE DES PERTES AVANT LE PROCESS A LA RAFFINERIE À CANNE À SUCRE DE Ferké 1

F. K. TOURE^{1*}, W. BEUGRE¹, I. COULIBALY¹, K. SEKONGO¹,
M. BEHOU¹ et G. A. M. BEUGRE²

¹ SUCAF-CI, Laboratoire Etudes Agronomiques à SUCAF-CI, Université Jean Lorougnon Guédé de Daloa, UFR Agroforestérie, Laboratoire AGROVALORISATION

² Université Jean Lorougnon Guédé de Daloa, UFR Agroforestérie, Laboratoire AGROVALORISATION

(reçu le 27 Avril 2025; accepté le 02 Juin 2025)

* Correspondance, e-mail : tourefabien@gmail.com

RÉSUMÉ

La présente étude porte sur la modélisation des pertes en saccharose avant le process à la raffinerie à canne à sucre de Ferké 1. Pour la mener, nous avons effectué l'analyse de la canne au champ (à la récolte), avant le process et à l'atelier de l'extraction afin de déterminer leur teneur en saccharose par la méthode à la presse, par la réfractométrie et la polarimétrie. Les pertes de saccharose avant le process ont été obtenues par la différence entre la richesse de la canne à la récolte et la richesse avant le process. Les pertes de saccharose au cours de l'extraction du jus ont été obtenues par la différence entre la richesse à l'entrée du premier moulin et la richesse usine. Les résultats obtenus montrent que la richesse de la canne à sucre baisse de $1,77 \pm 1,74$ % avant le process et de $0,58 \pm 0,60$ % au cours de l'extraction du jus. La relation entre les pertes de saccharose avant le process et les variables qui les influencent est traduite par l'Équation mathématique suivante :

$$\text{Pertes de saccharose avant usinage} = -0,91 + 0,02 \times \text{Non cannes \%} + 0,23 \times \text{Richesse au champ}$$

Déterminer et modéliser les pertes de saccharose avant usinage est la première étape pour les contrôler, les maîtriser et les optimiser.

Mots-clés : modèle mathématique, pertes, saccharose, moulin, non cannes.

ABSTRACT

Mathematic modelization of befor process losses in the sugar cane refinery of Ferké 1

The present study led to modelyze befor process losses in the sugar cane refinery of Ferké 1. We carried out it by analysing the sugar cane in the field (during the harvest), befor the process and in the extraction workshop to determin their sucrose content. The befor harvest sucrose losses were obtained by the difference between sucrose content in the field and sucrose content befor the process by the press méthode by refractometry et polarimetry. Sucrose losses during juice extraction were obtained by the difference between sucrose content befor the process and in the workshop of juice extraction. The results obtained showed that the cane sugar sucrose content lowered of $1.77 \pm 1.74 \%$ befor the process and of $0.58 \pm 0.60 \%$ during the juice extraction. The relation befor harvest sucrose losses and the variables that influence them was translated by the folowed mathematic *Equation* :

Sucrose losses befor the process = $-0,91 + 0,02 \times \text{Non cane } \% + 0,23 \times \text{cane sugar sucrose content in the field}$

Determine and modelize sucrose losses befor process is the first step to survey, monitoring and optimised them.

Keywords : *mathematic model, losses, sucrose, mill, non cane.*

I - INTRODUCTION

La canne à sucre, *Saccharum officinarum* L. (Poacées), est une plante pluriannuelle aux usages multiples. Selon [1], elle est principalement cultivée pour sa tige dont on extrait le sucre cristallisable : le saccharose. Le sucre est produit à partir de la betterave sucrière ou de la canne à sucre. La production mondiale de sucre, qui se chiffrait à 130,5 millions de tonnes en 2000-2001, se répartit pour environ 72 % à partir de la canne à sucre et 28 % à partir de la betterave selon [2]. Pour autant, la production de sucre provenant de la canne à sucre reste à améliorer afin de répondre aux exigences et enjeux de la concurrence dans un contexte de mondialisation de l'économie. Les principaux constituants de la canne à sucre sont le sucre et les fibres. La teneur en saccharose de la tige de canne à sucre (richesse) est de 16 % dans ses tiges avec un taux d'extraction qui peut atteindre 96 % lors d'un processus industriel [3]. La production industrielle du sucre granulé nécessite la récolte et le transport de la canne à sucre à l'usine et la production industrielle proprement dite. La richesse de la canne est de 15 % d'une façon courante lorsqu'on veut

caractériser la canne. Mais ces 15 % de saccharose ne seront pas ensachés en totalité, car même dans une usine parfaitement au point, des pertes interviendront en cours de la fabrication du sucre granulé. Elles sont importantes puisqu'elles sont considérées comme normale quand elles ne dépassent pas 3 points. Ceci veut dire qu'à partir d'une canne contenant 15 % de saccharose on ne récupérera que 12 %. Les pertes représenteront 20 % (soit 1/5^{ième}) du sucre élaboré et contenu dans la tige amenée à l'usine. Ces pertes se retrouvent dans la bagasse, la mélasse et les écumes et les pertes indéterminées [4]. Dans le but d'optimiser les sucreries à canne à sucre de la SUCAF-CI, ([5, 6]) a mené des études pour déterminer les paramètres influençant le rendement et le taux d'extraction réelle de l'usine de Ferké 1 et les paramètres influençant la détérioration post récolte de la canne à sucre de l'usine de Ferké 2 [7]. De par la nature des procédés de fabrication du sucre, des pertes en saccharose se produisent au cours de l'usinage. En effet, la fabrication fait intervenir des phénomènes physiques, mécaniques, thermiques, chimiques au cours desquels une partie du saccharose n'est pas récupérée ou est transformée en sucre non récupérable. Ces phénomènes laissent entrevoir des pertes pondérables et des pertes indéterminées.

Les pertes pondérables peuvent être mesurées en ce sens qu'elles se trouvent localisées dans les sous-produits de la fabrication : la bagasse, les tourteaux ou écumes et la mélasse. Les analyses de laboratoire montrent que ces sous-produits renferment du sucre en proportion variable suivant les techniques et la conduite de la fabrication. En sucrerie de cannes, les pertes de saccharose sont de l'ordre de 1 à 2,5 % en usine [8]. Mais la perte totale depuis la coupe au champ jusqu'à la production du sucre granulé (roux ou blanc) emballé peut atteindre 5 à 35 % selon les conditions des cannes récoltées au champ. Afin d'affronter les difficultés susceptibles d'être générées par la mondialisation de l'économie, toutes les sucreries fournissent plus d'effort pour minimiser les pertes en sucre et en combustible et augmenter par la suite le rendement à son seuil maximal. Bien que la détérioration de la canne avant l'usinage ait été considérablement étudiée, celle-ci n'a pas été transcrite en modèle mathématique et change suivant la température, l'humidité, la variété et l'état de la canne coupée [9]. La modélisation du procédé d'extraction et du raffinage au complet [10, 11] ou en parties ([12, 13]) est très utilisée pour le développement de modèles pouvant être considérés dans la stratégie de contrôle et d'automatisation des usines modernes. Des travaux dont le but est de proposer des stratégies pour réduire la consommation d'énergie et les pertes en saccharose lors du procédé sont réalisés pour des usines spécifiques [14 - 17]. Ces travaux apportent des solutions claires et applicables à l'usine analysée, lui permettant ainsi d'améliorer sa productivité et sa rentabilité. Un modèle mathématique est une représentation mathématique quantitative des

propriétés et des comportements pertinents d'un procédé. Un modèle est nécessairement une simplification de la réalité. Sa pertinence réside dans la capacité de décrire et de prédire les comportements importants pour la tâche pour laquelle il a été conçu. L'objectif principal de la modélisation mathématique est d'expliquer une variable de sortie par des variables explicatives. Afin d'améliorer la performance d'une usine et avant de recourir à la résolution d'autres problèmes et à l'amélioration ou rénovation des installations, la maîtrise et la minimisation des pertes sont primordiales. La présente étude a pour but d'optimiser les pertes de saccharose avant l'usinage de la canne à sucre dans le périmètre sucrier de la SUCAF-CI Ferké 1 par la modélisation mathématique.

II - MATÉRIEL ET MÉTHODES

II-1. Matériel

II-1-1. Site d'étude

L'étude a été conduite pendant 6 campagnes de récolte successive dans le périmètre sucrier de la raffinerie à canne à sucre de Ferké 1. Entreprise agro-industrielle qui fabrique et commercialise du sucre provenant de ses surfaces de canne irriguées et pluviales couvrant une superficie de plus de 14 500 hectare et aussi de canne villageoises, la SUCAF-CI est située au Nord de la Côte d'Ivoire où se trouve son siège social à 610 km d'Abidjan et dispose de deux unités agro industrielles (Ferké 1 et Ferké 2) distantes de 28 km. Ces sites se trouvent sur les rives du fleuve Bandama entre les rivières WAHA et LOHO.

II-1-2. Matériel végétal et biologique

Le matériel végétal est composé de plusieurs variétés commerciales de canne à sucre (dont FR8069, SP711406, SP701006, M1176/77, SP701423, R579, M1565/87, SP718210, DIVERS, NCO376, M2593/92, VMC9509, M2256/88, SP701143, M1400/86, SP792233, VMC9537, R570, M1334/84, VMC95105, N21, M2593/92 et R585). Le matériel biologique se compose des sous-produits obtenus au cours des différentes étapes du process industriel de production du sucre granulé. Lors de l'étape du broyage de la canne, les sous-produits étaient les jus des moulins et la bagasse.

II-1-3. Matériel technique

Il se compose de matériel de laboratoire pour l'analyse du matériel végétal et biologique.

II-2. Méthodes

La réalisation de cette étude nécessite :

- L'échantillonnage des tiges de canne à sucre à la récolte (dans les parcelles) selon les méthodes internes SUCAF-CI ;
- La récolte de la canne à sucre (brûlage, coupe et transport) à l'usine
- Broyage de la canne à sucre à l'usine pour en extraire le jus ;
- L'échantillonnage des sous- produits de la canne à sucre à l'usine (jus, bagasse) selon les protocoles d'échantillonnage des sous- produits selon les méthodes internes SUCAF-CI ;
- L'analyse des échantillons de canne à sucre à la récolte par la méthode à la presse décrite par [18] et des sous- produits prélevés à l'usine pour le dosage du saccharose.

L'analyse de la tige usinable nécessite des étapes de traitement supplémentaires effectuées par le laboratoire d'études agronomiques. Ces étapes sont décrites ci-après par [18] :

- les tiges usinables sont découpées en tronçons à l'aide d'une machette,
- elles sont ensuite défibrées à l'aide d'un désintégrateur de type Jeffco pour obtenir de la tige broyée que l'on appelle pulpe de canne,
- on prélève un sous échantillon de 500 g de pulpe de canne,
- ce sous échantillon est pressé à l'aide d'une presse hydraulique de type Emidecaux à une pression constante de 100 bars pendant 60 secondes,
- après pressage on obtient séparément du jus et un tourteau de bagasse.

Des analyses pour mesurer le Brix par réfractométrie et le Pol par polarimétrie sont réalisées sur le jus par [19].

- le relevé des données météorologiques (températures maximales et minimales journalières) et physicochimiques (poids, pressions, vitesse, rythmes, débits, doses, etc.) dans les bulletins, rapports, Bases de Données des différentes Directions Techniques.
- Le calcul des écarts entre la richesse agronomique et la richesse avant le premier moulin, entre la richesse agronomique et la richesse usine ;
- la constitution des bases de données
- l'analyse statistique des données ;
- la modélisation mathématique des pertes en saccharose avant l'usinage.

II-2-1. Constitution des bases de données

Après avoir échantillonné et analysé la canne à sucre et ses sous-produits, il reste à constituer les différentes bases de données (BD) qui seront utilisées pour les analyses statistiques des données. Pour cela, il faut relever les données

météorologiques (température journalières maximales, minimales, écart de température) et les données physiques de l'usine (rythme de broyage, durée et nature des arrêts, nombre d'heures de marche, dose de biocide, taux d'imbibition, etc.). Toutes ces données sont disponibles auprès des différentes Directions Techniques sous forme de rapports journaliers, périodiques et Bases de Données.

II-2-2. Analyse statistique des données

La saisie, le traitement hebdomadaire des données et le suivi des parcelles est fait sous Excel avec la base de données SCQEA BD Récolte et la base de données incorporée dans le fichier EXCELL utilisée pour l'établissement du bulletin journalier de la fabrication. L'interprétation et le traitement statistique des résultats est fait avec le logiciel STATISTICA version 7.1. Une analyse de variance (ANOVA) à un facteur a été utilisée pour déterminer la signification des campagnes au seuil de 5 %. Pour ce qui est de la corrélation entre les variables étudiées, l'analyse des corrélations a permis d'établir la liaison entre les deux variables. L'Analyse en Composantes Principales (ACP) et la modélisation mathématique ont permis respectivement de caractériser les campagnes par les variables liées aux pertes de saccharose avant l'usinage et de modéliser ces pertes par une équation mathématique.

III - RÉSULTATS

III-1. Évolution de la richesse de la canne à sucre de la récolte à l'usine

L'évolution de la richesse de la canne à sucre du champ à l'usine en passant au tapis (avant le 1^{er} moulin), et de 2019-2020 à 2024-2025 (**Tableau 1**) montre que la richesse de la canne à sucre baisse du champ (de la récolte) à l'usine. En effet, elle passe de $14,39 \pm 0,77$ % au champ à $12,62 \pm 0,79$ % au Tapis et $12,05 \pm 0,88$ % à l'usine. Elle baisse de donc $1,77 \pm 1,74$ % entre le champ et tapis, de $0,58 \pm 0,60$ % entre le tapis et l'usine. Au total, elle baisse de $2,34 \pm 2,35$ % entre le champ et l'usine (**Tableau 1**).

Tableau 1 : Évolution de la richesse de la canne à sucre de la récolte

Campagnes	Richesses (%)			Ecart (%)		
	Champ	Tapis (avant le 1 ^{er} moulin)	Usine	Agro-Tapis	Tapis-Usine	Agro-Usine
2019-2020	14,52c	12,97c	12,00b	1,55	0,97	2,52
2020-2021	14,21b	12,30a	11,69a	1,91	0,60	2,51
2021-2022	13,84a	12,55b	11,59a	1,28	0,96	2,24
2022-2023	14,60d	12,70bc	12,37c	1,90	0,32	2,23
2023-2024	14,69d	12,84c	12,53d	1,85	0,31	2,16
2024-2025	14,46c	12,50b	12,02b	1,96	0,48	2,44
Moyennes	14,39±0,77*	12,62±0,79*	12,05±0,88*	1,77±1,74	0,58±0,60	2,34±2,35
Normes				1,0		

* : Variation significative

ns : variation non significative

III-2. Étude statistique descriptive des variables liées aux pertes de saccharose avant usinage

Les Tableaux II, III et IV regroupent les variables liées aux pertes de saccharose avant usinage. Ces variables sont le taux de non cannes et les proportions de cannes récoltées manuellement, mécaniquement, en vert et après brulage. De la campagne 2019-2020 à la campagne 2024-2025, la canne récoltée avait une teneur moyenne en non cannes de 8,32 % (**Tableau 2**). Les taux de non cannes des cannes coupées mécaniquement ou manuellement sont supérieurs aux seuils respectifs de 8,0 % et 5,0 %. A Ferké 1, il existe 4 modes de coupe de la canne à sucre à la récolte : MV (cannes non brulées coupées manuellement) ; MB (cannes brulées coupées manuellement) ; QV (cannes non brulées coupées mécaniquement) et QB (cannes non brulées coupées mécaniquement). Ferké 1 usine en moyenne $3658,6 \pm 912$ tonnes de canne par jour pour une capacité de broyage de l'usine de 4500 tonnes (**Tableau 4**). Dans ces 3658,6 tonnes de cannes usinées, on retrouve 0,30 %, 56,10 %, 42,74 % et 0,85 % de cannes MV, MB, QV et QB respectivement (**Tableau 2**). L'objectif de la SUCAF-CI étant de récolter 50 % des cannes en coupe manuelle et 50 % en coupe mécanique. La canne coupée mécaniquement avait une teneur en non cannes de 9,26 % contre 5,99 % pour la canne coupée manuellement (**Tableau 3**).

Tableau 2 : *Évolution du taux de non cannes et des proportions de cannes récoltées manuellement, mécaniquement, en vert et après brulage*

Campagnes	Non cannes %	% MV	% MB	%QV	%QB
2019-2020	9,10d	0,17a	58,60d	41,22b	0,00a
2021-2022	8,45c	0,14a	53,44a	43,18c	3,25c
2021-2022	8,45c	0,14a	53,44a	43,18c	3,25c
2022-2023	8,04b	0,18a	56,09c	43,73c	0,00a
2023-2024	7,81a	0,14a	59,92e	39,88a	0,06a
2024-2025	7,16a	1,02a	53,68a	45,18d	0,12a
Moyennes	8,32 ± 3,27*	0,30 ± 3,66ns	56,10 ± 14,21*	42,74 ± 14,92*	0,85 ± 6,10*
Objectifs			50 %	50 %	

Non cannes % : Pourcentage de non Canne (déchets) dans les chargements de canne à sucre livrés à l'usine ; % MV : Pourcentage de cannes non brulées coupées manuellement ; % MB : Pourcentage de cannes brulées coupées manuellement ; %QV : Pourcentage de cannes non brulées coupées mécaniquement ; %QB : Pourcentage de cannes non brulées coupées mécaniquement ; TC Livrées/jour : tonnes de cannes coupées (récoltées) et livrées à l'usine pour l'usinage.

Tableau 3 : *Taux de non cannes dans la canne à sucre récoltée manuellement et mécaniquement de la campagne 2019-2020 à la campagne 2024-2025*

Type de coupe	%Non Canne (%)	Ecart type	Seuils SUCAF-CI
Mécanique	9,26b	2,99	< 8,00 %
Manuelle	5,99a	2,90	< 5,00 %
Moyennes	8,32*	3,30	< 9,00 %

* : variation significative ($p \leq 0,05$)

Tableau 4 : *Évolution des délais Brulage usinage, coupe usinage, de l'écart de température et du tonnage journalier de canne usinée*

Campagnes	Délai Brulage usinage (heure)	Délai coupe usinage (heure)	Ecart T° (°C)	Tonnes canne usinées/jour
2019-2020	25,32b	14,68c	18,13a	3766,2a
2020-2021	41,39d	23,57 ^c	17,52a	3735,2a
2021-2022	26,78c	16,80d	17,62a	3598,9a
2022-2023	26,79c	16,92d	17,66a	3605,4a
2023-2024	24,34b	13,60b	18,05a	3695,9a
2024-2025	19,94a	10,18a	18,68a	3573,1a
Moyennes	27,09 ± 12,51*	15,78 ± 10,32*	17,95 ± 4,2ns	3658,6 ± 912ns
Normes SUCAF-CI/Capacité	≤ 48h	≤ 36h		4500

Ecart T° : écart de température.

III-3. Corrélations entre les variables liées aux pertes de saccharose avant l'usinage

La **Figure 1** ci-dessous résume les liaisons entre les pertes de saccharose avant l'usinage (écart de richesse entre le champ et le tapis) et les variables qui lui sont liées. Les variables qui sont corrélées positivement avec l'écart de richesse entre le champ et le tapis sont la richesse au champ ($r = 0,30$), le %QV ($r = 0,09$) et le Non cannes % ($r = 0,08$). Ces variables réduisent les pertes de saccharose avant l'usinage (**Figure 1**). Les variables qui sont corrélées négativement avec l'écart de richesse entre le champ et le tapis sont l'écart de température ($r = -0,08$), les délais coupe usinage et brulage usinage ($r = -0,11$ et $-0,12$ respectivement), le %MB ($r = -0,10$) (**Figure 1**). Selon le test de corrélation, seule la corrélation entre l'écart de richesse Agro tapis et l'écart de température n'est pas significative ($p > 0,05$). L'écart de richesse Agro ta pis est corrélé principalement et positivement avec la richesse au champ ($r = 0,30$ à $p \leq 0,05$) (**Figure 1**). Cela signifie que pour réduire l'écart de richesse Agro tapis, il faut accroître le %MB (pourcentage de canne coupée manuellement après le brulage) et réduire le %Non cannes à moins de 5 % en coupe manuelle et moins de 8 % en coupe mécanique.

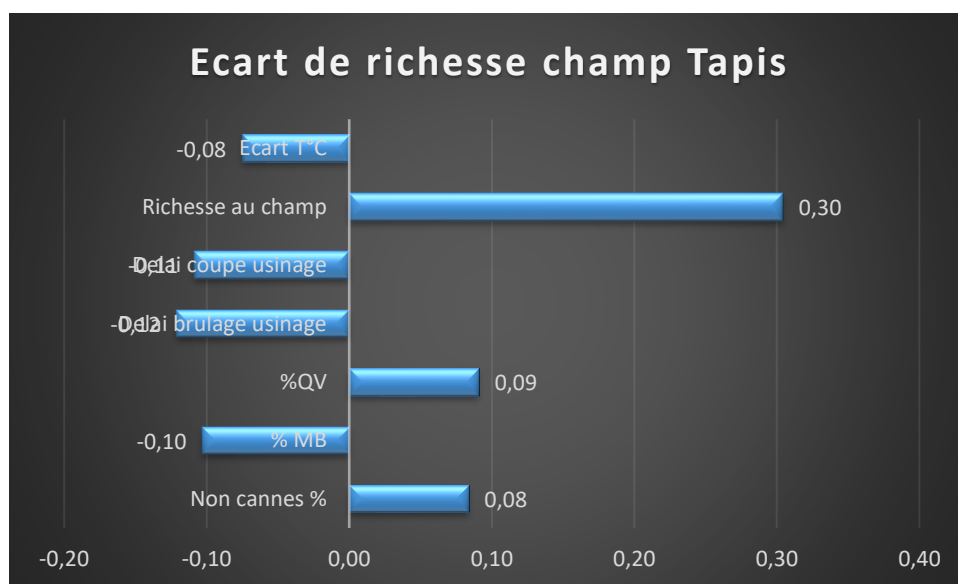


Figure 1 : Corrélations entre l'écart de richesse Agro tapis et les variables qui lui sont liés

Non cannes % : Pourcentage de non Canne (déchets) dans les chargements de canne à sucre livrés à l'usine ; % MB : Pourcentage de cannes brulées coupées manuellement ; %QV : Pourcentage de cannes non brulées coupées mécaniquement ; TC Livrées/jour : tonnes de cannes coupées et livrées à l'usine pour l'usinage ; Ecart T°C : écart de température.

III-4. Caractérisation des campagnes sucrières par les variables liées à l'écart entre les richesses au champ et au tapis

Les écarts de richesse entre le champ et le tapis les plus élevés (1,91 %, 1,9 %, 1,85 %, 1,96 %) ont été enregistrés respectivement au cours des campagnes 2020-2021, 2022-2023, 2023-2024 et 2024-2025 (*Tableau 1*). Les écarts de richesse entre le champ et le tapis élevés lors des campagnes 2022-2023, 2023-2024 et 2024-2025 sont donc dus aux richesses au champ élevées de ces trois dernières campagnes alors que c'est le taux de non cannes le plus élevé qui a été enregistré au cours de la campagne 2020-2021 qui est la cause de l'écart de richesse entre le champ et le tapis élevé (*Tableau 1*). La projection des campagnes sucrières sur le plan factoriel (*Figure 2*) nous permet de les caractériser par les variables liées à l'écart entre les richesses au champ et au tapis (*Figure 3*). La variable la plus fortement corrélée avec l'écart de richesse entre le champ et le tapis est la richesse au champ (*Figure 2*).

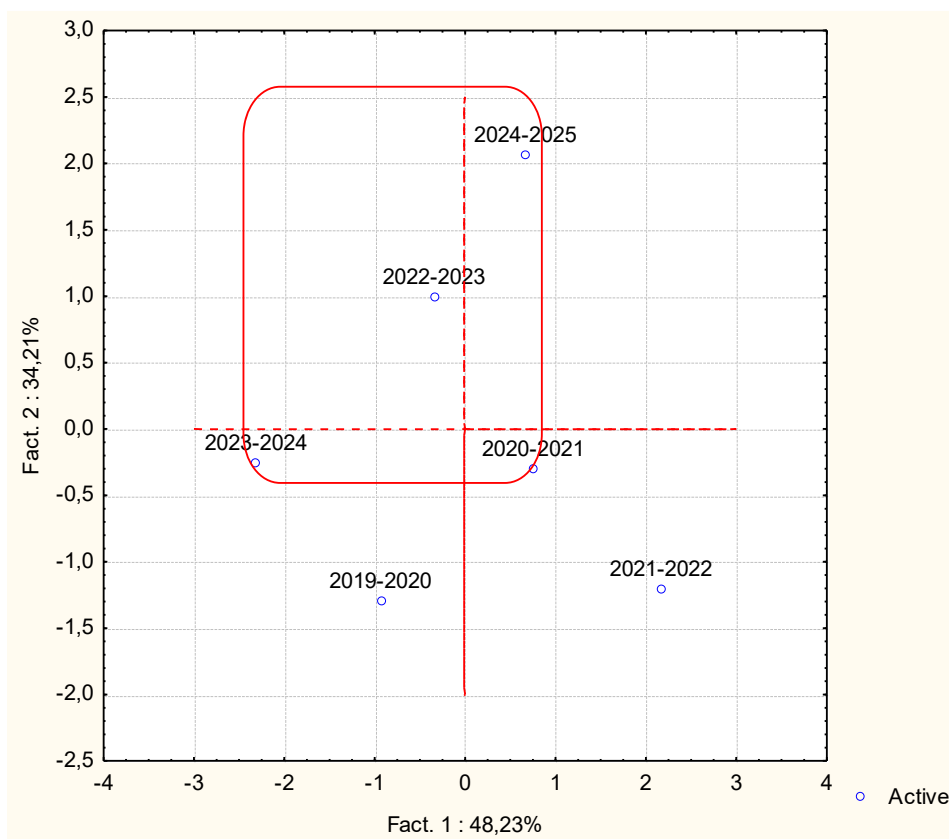


Figure 2 : Projection des campagnes sucrières sur le plan factoriel pour leur caractérisation par les variables liées à l'écart entre les richesses au champ et au tapis

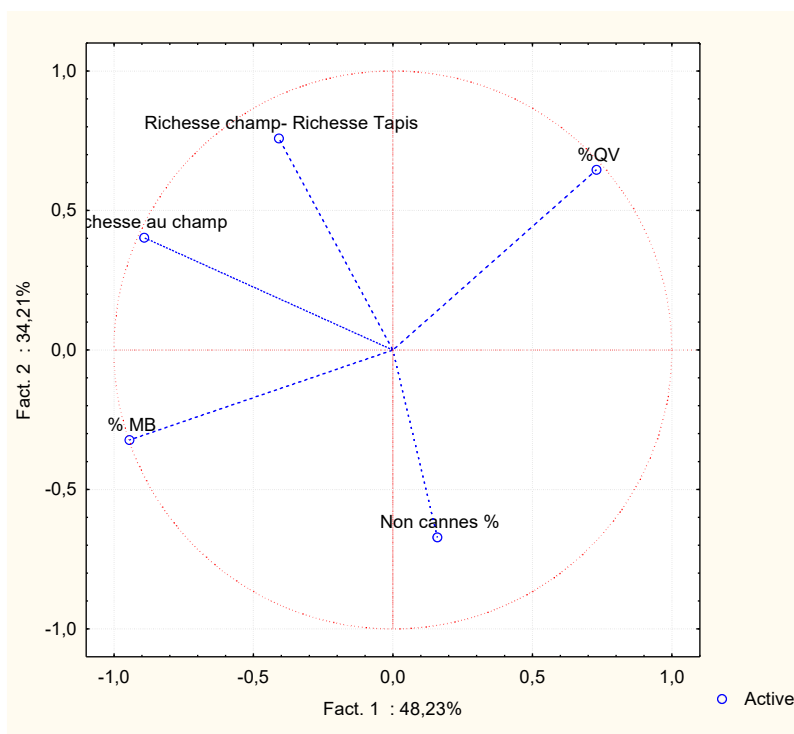


Figure 3 : *Projection des variables liées à l'écart entre les richesses au champ et au tapis sur le plan factoriel pour la caractérisation des campagnes sucrières*

III-5. Modélisation mathématique des pertes de saccharose avant l'usage

La relation entre l'écart de richesse Agro tapis (pertes de saccharose avant usinage) et les variables qui lui sont liées est traduite par *l'Équation* suivante (*Tableau 5*) :

$$\text{Ecart de richesse champ tapis} = -0,91 + 0,02 * \text{Non cannes \%} + 0,23 * \text{Richesse au champ} \quad (1)$$

Pour réduire l'écart de richesse Agro tapis, il faut réduire le taux de non cannes et la richesse de la canne à sucre.

Tableau 5 : *Résultat de l'étude de régression entre l'écart de richesse Agro tapis et les variables qui lui sont liées*

	Bêta	Err-Type de Bêta	B	Err-Type de B	t(554)	niveau p
OrdOrig.			-0,91	0,57	-1,58	0,11
Non cannes %	0,11	0,04	0,02	0,01	2,62	0,01 p ≤ 0,05
% MB	-0,14	0,09	-0,01	0,00	-1,61	0,11
%QV	-0,13	0,09	-0,01	0,00	-1,50	0,13
Délai Brulage usinage	-0,04	0,16	0,00	0,01	-0,25	0,80
Délai coupe usinage	-0,06	0,15	0,00	0,01	-0,39	0,70
Richesse au champ	0,31	0,04	0,23	0,03	7,44	0,00 p ≤ 0,05
Ecart T°C	-0,06	0,04	-0,01	0,01	-1,53	0,13

%MB : pourcentage de canne brûlée et coupée manuellement ; %QV : pourcentage de canne coupée mécaniquement en vert ; Ecart T°C : écart de température

IV - DISCUSSION

IV-1. Perte en saccharose avant l'usinage de la canne

Dans la présente étude, la richesse de la canne à sucre baisse du champ (à la récolte) à l'usine. En effet, elle passe de $14,39 \pm 0,77$ % au champ à $12,62 \pm 0,79$ % au Tapis et $12,05 \pm 0,88$ % à l'usine. Elle baisse donc de $1,77 \pm 1,74$ % entre le champ et tapis, de $0,58 \pm 0,60$ % entre le tapis et l'usine. Au total, elle baisse de $2,34 \pm 2,35$ % entre le champ et l'usine (Tableau I). Cette baisse de $1,77 \pm 1,74$ % est supérieure à celle enregistrée par [20] en Colombie. En effet, de 2015 à 2017, dans l'industrie sucrière colombienne, le Pol % canne (richesse) au champ et à l'usine ont baissé d'environ 1 point. Celui du champ est passé de 15,92 % en 2015 à 14,84 % en 2017 quand la richesse usine passait de 13,39 % à 12,32 % en 2017 selon les travaux de [20]. Cette baisse de richesse du champ à l'usine montre que la canne à sucre subit une détérioration post récolte. En sucrerie de canne, avant l'usinage, les pertes en saccharose sont très susceptibles de se produire, mais elles présentent l'inconvénient de ne pas pouvoir être chiffrées [21]. De premier abord, en effet, comment contrôler chaque manœuvre au moment de la coupe des cannes et de leur transport au bord des champs : certaines tiges peuvent disparaître sous la paille, certaines peuvent être consommées, certaines peuvent rester au bord des champs et le long de la route. Les pertes tiennent aussi de la nature même du

saccharose qui s'hydrolyse facilement avec le temps en donnant le glucose et le fructose qui sont des sucres invertis et incristallisables [21]. Cela montre que la canne à sucre subit une détérioration post-récolte au cours de son transfert de la parcelle à l'usine. Les pertes en saccharose entre la récolte et le process industriel de production du sucre de table sont fréquemment inconnues et dans certains cas sous estimées. La détérioration de la qualité de la canne au cours de la récolte ne cause pas seulement des pertes à cette étape, mais aussi diminue le taux général de récupération dans l'usine selon Gil et Sanchez [20]. Généralement, la canne commence à se détériorer immédiatement après la coupe et le brûlage. La pureté du jus dépend non seulement des facteurs agronomiques et climatiques mais aussi du délai entre le brûlage, la coupe et l'usinage de la canne. Cette détérioration est causée essentiellement par deux types de processus. Le premier inclut l'inversion du saccharose par des enzymes naturellement présentes dans la canne, tandis que le second prédominant par temps chaud et humide peut engendrer des pertes rapides et importantes en sucre, impliquant l'infection de la canne par des micro-organismes qui secrètent des invertases.

Plusieurs études montrent l'importance des micro-organismes dans la détérioration de la richesse de la canne. Les micro-organismes sont toujours présents dans la canne verte et la réinfection par des insectes, la pluie, le vent et par contamination directe du sol, survient rapidement après brûlage. Le brûlage peut en fait faciliter l'infection en causant l'éclatement de la canne coupée et l'épanchement du jus. La cinétique de la détérioration dépend de la température, de l'humidité, de la variété et de l'état de la canne coupée. Bien que la détérioration ait été considérablement étudiée, celle-ci n'a pas été transcrite en modèle mathématique et change suivant les facteurs précités. Des études faites en République Sud-Africaine, sur la détérioration de la richesse de la canne de variété NCO 376 ont permis de conclure que celle-ci peut être traitée comme une réaction chimique, et on présume que la réaction est du premier ordre cinétique selon les travaux de [21]. En sucrerie de betterave, la qualité agronomique des racines a une importance majeure sur la conservation en silo, et elle est étroitement liée à la qualité industrielle des racines. Cette dernière est notamment dépendante de l'itinéraire cultural, des conditions de récolte et de stockage en silo. Il a été rapporté qu'au cours du stockage, le saccharose est transformé en d'autres composés pour permettre à la racine de survivre dans ce nouvel environnement. Une dégradation trop importante du saccharose cause des problèmes en process industriel, en raison de la production de molécules indésirables. En effet, en plus des pertes en saccharose au cours du stockage, des molécules nuisibles au procédé sucrier sont synthétisées. Il s'agit de sucres réducteurs (glucose et fructose), de polymères (dextranes, raffinose), et de produits de fermentation (alcools et

acides organiques) principalement. Ceux-ci vont, par exemple, bloquer les filtres en process, acidifier et colorer les jus, ou encore altérer la morphologie des cristaux de sucre [22].

IV-2. Facteurs impactant les pertes de saccharose avant l'usinage

Dans la présente étude, de la campagne 2019-2020 à la campagne 2024-2025, la canne récoltée avait une teneur moyenne en non cannes de 8,32 % (**Tableau 2**). Les taux de non canne des cannes coupées mécaniquement ou manuellement sont supérieurs aux seuils respectifs de 8,0 % et 5,0 %. Ferké 1 usine en moyenne $3658,6 \pm 912$ tonnes de canne par jour pour une capacité de broyage de l'usine de 4500 tonnes (**Tableau 4**). Dans ces 3658,6 tonnes de cannes usinées, on retrouve 0,30 %, 56,10 %, 42,74 % et 0,85 % de cannes MV, MB, QV et QB respectivement (**Tableau 2**). L'objectif de la SUCAF-CI étant de récolter 50 % des cannes en coupe manuelle et 50 % en coupe mécanique. La canne coupée mécaniquement avait une teneur en non cannes de 9,26 % contre 5,99 % pour la canne coupée manuellement (**Tableau 3**). Toujours dans la présente étude, les variables qui sont corrélées positivement avec l'écart de richesse entre le champ et le tapis sont la richesse au champ ($r = 0,30$), le %QV ($r = 0,09$) et le Non cannes % ($r = 0,08$). Ces variables réduisent les pertes de saccharose avant l'usinage (**Figure 1**). Les variables qui sont corrélées négativement avec l'écart de richesse entre le champ et le tapis sont l'écart de température ($r = -0,08$), les délais coupe usinage et brulage usinage ($r = -0,11$ et $-0,12$ respectivement), le %MB ($r = -0,10$) (**Figure 1**). Selon le test de corrélation, seule la corrélation entre l'écart de richesse Agro tapis et l'écart de température n'est pas significative ($p > 0,05$). L'écart de richesse Agro ta pis est corrélé principalement et positivement avec la richesse au champ ($r = 0,30$ à $p \leq 0,05$) (**Figure 1**). Cela signifie que pour réduire l'écart de richesse Agro tapis de Ferké 1, il faut accroître le %MB (pourcentage de canne coupée manuellement après le brulage) et réduire le %Non cannes à moins de 5 % en coupe manuelle et moins de 8% en coupe mécanique. Encore dans la présente étude, les écarts de richesse entre le champ et le tapis les plus élevés (1,91 %, 1,9 %, 1,85 %, 1,96 %) ont été enregistrés respectivement au cours des campagnes 2020-2021, 2022-2023, 2023-2024 et 2024-2025 (**Tableau 1**). Les écarts de richesse entre le champ et le tapis élevés lors des campagnes 2022-2023, 2023-2024 et 2024-2025 sont donc dus au richesses au champ élevés de ces trois dernières campagnes alors que c'est le taux de non cannes le plus élevé qui a été enregistré au cours de la campagne 2020-2021 qui est la cause de l'écart de richesse entre le champ et le tapis élevé (**Tableau 1**). La projection des campagnes sucrières sur le plan factoriel (**Figure 2**) nous permet de les caractériser par les variables liées à l'écart entre les richesses au champ et au tapis (**Figure 3**). La variable la plus fortement

corrélée avec l'écart de richesse entre le champ et le tapis est la richesse au champ (**Figure 2**). La relation entre l'écart de richesse Agro tapis (pertes de saccharose avant usinage) et les variables qui lui sont liées est traduite par l'**Équation** suivante (**Tableau 5**) :

$$\text{Ecart de richesse champ tapis} = -0,91 + 0,02 * \text{Non cannes \%} + 0,23 * \text{Richesse au champ} \quad (2)$$

Pour réduire l'écart de richesse Agro tapis, il faut réduire le taux de non cannes mais maintenir voir même accroître la richesse au champ car d'autres pertes en saccharose se produiront au cours de l'usinage. Il est donc préférable de produire la canne à sucre la plus riche possible en saccharose. La qualité de la canne à sucre est un facteur primordial dans la fabrication du sucre de table. La meilleure canne à sucre se décline conjointement sous deux formes : celle atteignant une certaine maturité (à savoir 11 à 12 mois d'âge) et celle pour laquelle la concentration en saccharose est maximale. Ainsi, la canne à sucre doit être traitée immédiatement après la coupe afin d'éviter sa détérioration mécanique, bactériologique ou encore l'inversion du saccharose et de la fonction dextrane par les microorganismes tels les *Leuconostoc mesenteroides* ([23, 24]). Selon [20], la qualité de la canne est affectée par les pertes en pol (saccharose) avant et après la récolte. Les facteurs qui affectent la qualité de la canne avant la récolte sont les maladies et les ravageurs, les pratiques culturales, l'âge de la canne à la récolte, le moment de la récolte. Les facteurs qui affectent la qualité de la canne après la récolte sont le taux de déchets, le type de récolte, la variété et le délai entre la récolte et le broyage. Pour [20], les facteurs qui contribuent aux pertes en pol entre la récolte et le process sont le brûlage (3 % à 4%), les matières étrangères (1 % pour chaque 1 % de déchets), le délai entre la coupe et le broyage à l'usine et le mode de coupe de la canne. La récolte manuelle en vert occasionne une perte en pol de $0,17 \pm 0,24$ % contre $0,24 \pm 0,06$ % pour la canne brûlée coupée manuellement, $1,10 \pm 0,19$ % pour la canne coupée mécaniquement en vert, et $0,52 \pm 0,24$ % pour la canne brûlée coupée mécaniquement [20]. Le brûlage de la canne enlève la cire qui couvre la canne, occasionne des fissures permettant l'accès aux microorganismes et la déshydratation de la canne. Les matières étrangères accroissent les pertes en pol et accroissent la couleur du jus de la canne à sucre [20]. Le climat impacte tous les stades du cycle de culture de la canne à sucre, notamment la maturité. La maturité intéresse au plus haut point l'agriculteur et l'usinier. Le but de la culture est de produire le rendement sucre maximum à l'hectare. Ce rendement dépend du tonnage de matière verte produit à l'hectare et de la teneur en saccharose de cette matière. Pour que les conditions d'une bonne maturité soient réunies, il faut d'abord que la croissance de la tige soit ralentie ou arrêtée pour que le sucre produit chaque jour par la plante s'accumule en réserve et ne soit pas utilisé à la fabrication de nouveaux tissus

végétaux. C'est la raison pour laquelle les conditions d'une bonne maturité sont réunies quand les températures moyennes journalières sont basses, l'alimentation en eau est réduite ou nulle, l'alimentation en azote est nulle. Il est également très intéressant que les différences entre les températures nocturnes/ diurnes soient très élevées. En effet la plante est pendant la journée le siège de deux fonctions : respiratoire et chlorophyllienne. La première détruit les sucres que la seconde élabore ; tant que le bilan est positif la canne peut accumuler du sucre. La nuit, la plante continue de respirer donc à consommer des réserves sucrées, alors qu'elle n'en fabrique plus, le bilan est toujours négatif. Comme l'intensité de la fonction respiratoire est liée à la température ambiante, plus les nuits sont froides, moins la plante respire et on enregistre des pertes de sucres inférieures à celles observées quand la chaleur nocturne est élevée. La maturation est donc optimum quand les nuits sont froides et que les journées sont suffisamment chaudes. Encore faut-il que les journées ne soient pas chaudes car au-delà de certaines températures (vers 33°C), la fonction chlorophyllienne est ralentie. Tout ce qui précède montre que la culture de la canne à sucre et son succès dépendent beaucoup des facteurs climatologiques. De la récolte à la transformation de la production pour extraction du sucre, il est possible d'obtenir jusqu'à 8 produits et coproduits. Ces produits et coproduits sont : les résidus de récolte laissés au champ appelés les non cannes (9 %), les déchets liquides, la boue (écume), la mélasse, les cendres, la bagasse et le sucre de table selon [25].

IV-3. Perte en saccharose au cours de l'extraction du jus de la canne

Au cours de l'extraction du jus du processus de la fabrication, nous avons effectué l'analyse de la canne entrée à l'usine afin d'évaluer le poids de sucre qu'il contient. Pour connaître le taux du sucre perdu pendant l'extraction, nous avons contrôlé les produits de moulins (les jus de moulin, le jus mélangé et la bagasse). Sur les résultats d'expérience, on a deux richesses de la canne :

- la richesse expérimentale ou richesse tapis : c'est la richesse de la canne obtenue à partir de l'analyse directe de la masse de fibre avant d'entrer au défibreur.
- la richesse industrielle ou richesse usine : c'est la richesse obtenue par la somme de Pol du jus mélangé pour cent cannes et le Pol de la bagasse pour cent cannes. Cette richesse est prise pour le calcul de tout le bilan dans la fabrication. Les jus de canne contiennent toujours des microbes qui peuvent détruire le saccharose. Pour cela, les pertes indéterminées sont causées par l'action de ces microbes et ainsi que par le débordement ou les fuites des cuves de récupération. Les pertes aux moulins sont déterminées par la différence entre la richesse tapis et la richesse usine; donc plus la différence entre les deux richesses est

élevée, plus la perte en sucre dans la bagasse et la perte en sucre indéterminée sont excessives. D'ailleurs, la détermination du coefficient glucosique ou l'évolution des sucres réducteurs est le moyen le plus efficace pour savoir l'existence du phénomène d'inversion car pour cette opération, la réaction d'hydrolyse du saccharose est facile à cause de la faible valeur du pH dans le jus (pH = 5,5). Les deux richesses précédentes sont utilisées pour la détermination du taux de sucre perdu au cours de l'extraction du jus. Les pertes indéterminées sont dues à la mauvaise sanitation de moulins et à l'insuffisance du produit désinfectant pendant l'opération.

Dans la présente étude, la richesse de la canne à sucre baisse $0,58 \pm 0,60\%$ entre au cours de l'étape de l'extraction du jus de canne (le tapis et l'usine). On constate que la richesse industrielle est toujours inférieure à la richesse expérimentale à cause de la perte en sucre pendant le passage du jus aux moulins. Dans l'industrie sucrière, l'extraction de jus de cannes à la batterie de moulins est une opération très importante. Le but est d'extraire le taux maximum possible du sucre contenu dans la masse de fibre pour [26]. La perte en sucre proprement dite aux moulins, est due à trois causes : L'inversion ou hydrolyse acide : 16 % des pertes totales sont dues à ce mode de dégradation ; L'inversion enzymatique : elle est influencée par la température et la concentration du jus. Toujours d'après [26], elle occasionne 22 % des pertes totales ; et l'infection microbienne : 62 % des pertes totales sont dues à l'infection. Pendant l'extraction du jus, lorsque la sanitation des moulins est insuffisante, la perte totale par inversion peut atteindre 0,25 % de canne. Les pertes d'origine microbienne peuvent notamment diminuer mais, sans toutefois disparaître pour une usine bien désinfectée. Cette diminution de la perte peut admettre jusqu'à 0,09Kg de saccharose pour 100Kg de canne [26]. L'insuffisance de la sanitation de moulins produit une odeur aigre près des moulins et la présence de limon ou de colonies de *Leuconostoc*. Ces deux indices sont des facteurs qui favorisent l'inversion du saccharose. Le jus mélangé qui sera envoyé en fabrication contient des particules de fine bagasse, de pierre désintégrée, du sable et de la terre. Une élimination des particules de fine bagasse se fait par un tamisage (tamis Dorr Oliver DSM). La contamination est très sensible lors du passage du jus sur le tamis séparateur de fine bagasse. Donc, pour empêcher cette contamination, il faut faire les barres latérales en bronze "everdur", car les bactéries se développent plus difficilement en présence de ce métal. La boîte déversoir et la cavité à jus derrière le tamis sont en acier inoxydable.

V - CONCLUSION

Dans la présente étude, la richesse de la canne à sucre baisse du champ (à la récolte) à l'usine. En effet, elle passe de $14,39 \pm 0,77$ % au champ à $12,62 \pm 0,79$ % au Tapis et $12,05 \pm 0,88$ % à l'usine. Elle baisse donc de $1,77 \pm 1,74$ % entre le champ et tapis, de $0,58 \pm 0,60$ % entre le tapis et l'usine. Toujours dans la présente étude, les variables qui sont corrélées positivement avec l'écart de richesse entre le champ et le tapis sont la richesse au champ ($r = 0,30$), le %QV ($r = 0,09$) et le Non cannes % ($r = 0,08$). Ces variables réduisent les pertes de saccharose avant l'usinage. Les variables qui sont corrélées négativement avec les pertes de saccharose avant l'usinage sont l'écart de température ($r = -0,08$), les délais coupe usinage et brulage usinage ($r = -0,11$ et $-0,12$ respectivement), le %MB ($r = -0,10$). Selon le test de corrélation, seule la corrélation entre l'écart de richesse Agro tapis et l'écart de température n'est pas significative ($p > 0,05$). Cela signifie que pour réduire l'écart de richesse Agro tapis de Ferké 1, il faut donc accroître le pourcentage de canne coupée manuellement après le brulage et réduire le %Non cannes à moins de 5% en coupe manuelle et moins de 8 % en coupe mécanique. L'équation mathématique entre les pertes de saccharose avant usinage et les variables qui lui sont liées est traduite par ***l'Équation*** suivante :

$$\text{Pertes de saccharose avant usinage} = -0,91 + 0,02 \times \text{Non cannes \%} + 0,23 \times \text{Richesse au champ}$$

Pour réduire les pertes de saccharose avant usinage, il faut réduire le taux de non cannes mais maintenir voir même accroître la richesse au champ car d'autres pertes en saccharose se produiront au cours de l'usinage. Il est donc préférable de produire la canne à sucre la plus riche possible en saccharose.

RÉFÉRENCES

- [1] - R. FAUCONNIER, La canne à sucre. Techniques agricoles et productions tropicales Maisonneuve et Larose. Paris, (1991) 165 p.
- [2] - M. DECLOUX, Procédés de transformation en sucrerie (partie1). Techniques de l'ingénieur. F6150, (2002) 1 - 18
- [3] - M. AMRANI, Détermination de la Qualité du Pain de Sucre a Partir des Concentrations des Sucres Réducteurs. AJST, Vol. 7, N° 1 (2006)
- [4] - C. KAPSEU, A. AHMED et N. TEDGAN, Contribution à la Réduction des Pertes à la sucrerie – raffinerie de Canne. *Journal of Food Engineering*, 20 (1) (1993) 45 - 53

- [5] - F. K. TOURE, BOHOUSOU, E. KOFFI et G. N. AGBO, facteurs liés au rendement dans la raffinerie de canne du perimetre sucrier de Ferké 1 en Côte D'Ivoire. *Agronomie Africaine*, 22 (1) (2010a) 85 - 95
- [6] - F. K. TOURE, E. KOFFI et G. N. AGBO, Influence des facteurs technologiques et physico-chimiques sur le taux d'extraction réelle de la raffinerie de canne du perimetre sucrier de Ferke 1 en Côte D'Ivoire. *Agronomie Africaine*, 22 (2) (2010b) 163 - 173
- [7] - F. K. TOURE, Evolution de la richesse, de la pureté et du coefficient glucosique de la canne à sucre de la coupe au broyage au complexe sucrier de Ferke 2 de la SUCAF-CI. *Agronomie Africaine*, 25 (1) (2013) 1 - 12
- [8] - REGIONAL Trading Centre. Cours internationaux en fabrication de sucre de canne. Tome I. RTC, Robert Antoine Building, Réduit-Mauritius, (2012)
- [9] - RANAIVOSON, Herilalaina Lantotiana Olaf et RAMINDO Gaëtan. Etude du phénomène d'inversion durant la fabrication du sucre. Mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur en Génie Chimique. Université d'Antananarivo, Ecole Supérieure Polytechnique, (1999) 121 p.
- [10] - J. F. ALVAREZ, C. Y. BAEZ-SMITH et L. W. WEISS, Modeling the New Technology Raw Sugar Factory/Refinery Using Sugars TM For Windows, Article soumis, (2005)
- [11] - J. M. ZAMARREÑO, P. VEGA, L. D. GARCÍA et M. FRANCISCO, State-space Neuronal Network for Modelling Prediction and Control. *Control Engineering Practice*, 8/9, (2000) 1063 - 1075
- [12] - B. GRONDIN-PEREZ, M. BENNE, C. BONNECAZE et J. P. CHABRIAT, Industrial Multi-step Forward Predictor of Mother Liquor Purity of the Final Stage of A Cane Sugar Crystallisation Plant. *Journal of Food Engineering*, 66 (3) (2005) 361 - 367
- [13] - C. CADET, Y. TOURÉ, G. GILLES et J. P. CHABRIAT, Knowledge Modeling and Nonlinear Predictive Control of Evaporators in Cane Sugar Production Plants. *Journal of Food Engineering*, 40 (1) (1999) 59 - 70
- [14] - P. G. WRIGHT, T. A. SILVA et K. AMADOR, Improving the Process Steam economy in a Cane Sugar Factory: A Case History of A Successful Cogeneration Project. *International Sugar Journal*, 107 (1279) (2005) 425 - 430
- [15] - B. P. LAVARACK, J. J. HODGSON, R. BROADFOOT, S. VIGH et J. VENNING, Improving the Energy Efficiency of Sugar Factories: case Study for Pioneer Mill. *International Sugar Journal*, 106 (1266) (2004) 337 - 343
- [16] - O. GOZA-LEON and H. PEREZ DE ALEJO VICTORIA, An Expert System for the Analysis of Energy Systems in cane Sugar Factories. *New Review of Applied Expert Systems and Emerging Technologies*, 6 (2000) 65 - 80

- [17] - C. KAPSEU, A. AHMED et N. TEDGAN, Contribution à la Réduction des Pertes à la sucrerie – raffinerie de Canne. *Journal of Food Engineering*, 20 (1) (1993) 45 - 53
- [18] - D. SABATIER, Influences des facteurs agro-climatiques sur les modalités d'allocation de la biomasse produite aux différentes composantes lignocellulosiques des structures de la canne à sucre. Thèse. AgroParisTech. UMR Environnement & Grandes Cultures. 1091, F-78850 Thiverval Grignon, France, (2012) 230 p.
- [19] - N. BERDING and D. H. MARSTON, Operational validation of the efficacy of Spectracan, a high-speed analytical system for sugarcane quality components. *Proc. Aust. Soc. Sugar Cane Technol.*, 32 (2010) 445 - 459
- [20] - GIL Nicolas and Sanchez Tatiana. Cane sugar losses between harvesting and processing. ISSCT. Factory engineering and processing workshop. Cali, Colombia, (2018) 20 p.
- [21] - GRELIONNET, A. R. T. A. S. (Association Réunionnaise pour la Technologie Agricole et Sucrière)", 3ème Congrès International du 16 au 23 octobre 1988-Saint-Denis La Réunion, (1988)
- [22] - E. REINEFELD, Discussion of paper 'Effect of dextran on second carbonatation filtration. In Comptes Rendus de la XV me Assemblée Générale de la Commission Internationale Technique de Sucrerie, (1975) 247 p.
- [23] - C. P. CHEN, Manual del azúcar de caña. Edicion Limusa, Mexico, (2000) 32 - 37, 41 - 43, 163 - 190
- [24] - M. ARGUELLO-MORALES, M. SANCHEZ-GONZALES, M. CANEDO, M. QUIRASCO, A. FARRES et A. LOPEZ-MUNGUIA, Proteolytic modification of *Leuconostoc mesenteroides* B-512F dextranucrase. *Antonie Van Leeuwenhoek*, 87 (2) (2005) 131 - 141
- [25] - O. ALMAZAN, L. GONZALEZ and L. GALVEZ, The sugar cane, its by-products and coproducts. AMAS. *Food and Agricultural Research Council, Réduit*, Mauritius, (1998)
- [26] - E. HUGOT, La sucrerie de canne. In : « carbonatation ». Lavoisier. Tec & Doc, 3ème édition, (1987) 738 p.

Protocoles d'analyse et d'échantillonnage de la SUCAF-CI

Procédures des laboratoires d'études agronomiques

Procédure d'échantillonnage des cannes à la Récolte

Logigramme de la préparation des échantillons de canne

PROCEDURE DE MESURE POL BRIX ET FIBRE DE LA CANNE

Procédures des laboratoires d'usine

PR029 : PROCEDURE MESURE DU BRIX ET DU POL DES JUS SANS
ACETATE DE PLOMB V1

PR069 : PROCEDURE D'ECHANTILLONNAGE DES JUS V1

PR070 : PROCEDURE D'ECHANTILLONNAGE DE LA BAGASSE V1

Bases de données, bulletins et périodiques :

BD Non cannes F1F2

BD Ecart de richesse F1F2

BD Cannes à la récolte F1F2

Bulletins journaliers de fabrication de l'usine de Ferké 1

Bulletins journaliers de la récolte de l'usine de Ferké 1

BD Météo F1F2