

Sommaire du CHAPITRE 9

Plantes à sucre

<u>Introduction : Sources de sucre</u>	2
<u>La betterave à sucre</u>	2
Description de la plante	3
Évolution de la betterave à sucre :	5
Écologie et méthodes de cultures :	5
Amélioration génétique de la betterave à sucre :	6
Extraction et raffinage du sucre de la betterave à sucre :	6
Statistiques de production pour l'orge (FAOSTAT 2001, révisé)	7
<u>La canne à sucre</u>	8
Description de la canne à sucre :	10
Origines de la culture de la canne à sucre :	10
Écologie et méthodes de culture de la canne à sucre :	12
Statistiques de production pour 2001 (FAOSTAT, révisé)	13
Références	14

Introduction : sources de sucre

Le sucre que nous utilisons maintenant avec profusion pour la préparation de desserts, de boissons et de mets de tous genres n'a pas toujours été le produit abondant et bon marché que nous connaissons. Les sources de sucre cristallisé que nous achetons aujourd'hui au supermarché proviennent majoritairement de l'extraction et le raffinage du sucre de deux plantes, la canne à sucre et la betterave à sucre, que nous discuterons en détail dans ce cours. Ces deux plantes fournissent des concentrations élevées de saccharose, un disaccharide, qui a la propriété de cristalliser lorsqu'il est concentré. Pendant la période de l'Antiquité et jusqu'à la Renaissance le sucre était considéré un luxe ou une médecine que seule la noblesse et les plus riches pouvaient se procurer. Le sucre cristallisé était extrait et raffiné il y a 4,000 ans en Inde à partir de la canne à sucre et la sève sucrée extraite des pédoncules des spadices (inflorescences) de plusieurs espèces de palmiers était concentrée pour obtenir un sirop concentré (jaggeri) dans plusieurs régions équatoriales de l'Asie et de l'Afrique depuis l'Antiquité, la production était utilisée localement et très peu de cette production n'était exportée vers l'Europe ou à d'autres régions tempérées jusqu'à la période de la Renaissance. Pourtant le sucre est disponible dans les fruits et autres organes de beaucoup de plantes supérieures et l'homme préhistorique a certainement profité de leur présence pour se nourrir de ce produit végétal riche en énergie. Le miel, qui est élaboré par les abeilles à partir du nectar des fleurs et qui doit être considéré un produit d'origine végétal, est probablement une des premières sources de sucre concentré qui a été utilisée par l'homme préhistorique. Les pratiques de l'apiculture organisée est une activité ancienne qui remonte au 4ème millénaire A.J.C. au Moyen-Orient et au 1er millénaire A.J.C. en méso-amérique. Plus de 560 espèces de plantes qui produisent des fruits sucrés ou une sève contenant du sucre (Palmiers, érable à sucre) ont été répertoriées dans diverses régions du monde. Contrairement à la canne à sucre et à la betterave à sucre, les sucres produits par la grande majorité de ces espèces contiennent très peu ou pas de saccharose et sont des combinaisons de monosaccharides (glucose, fructose, mannose, etc.) qui n'ont pas la capacité de cristalliser lorsqu'ils sont concentrés. Le maïs et le sorgho ainsi que le mésocarpe des fruits de plusieurs légumineuses (exemples du caroubier, *Ceratonia siliqua*, et du mesquite, *Prosopis juliflora*) et de palmiers produisent des monosaccharides en concentrations élevées dans leur sève et leurs fruits qui, dans le cas du dattier, *Phoenix dactylifera*, peuvent atteindre 70% du poids du mésocarpe du fruit. Certaines plantes produisent des substances qui sont bien plus sucrées que le sucre issu du saccharose ou de monosaccharides. C'est le cas de la thaumatococcine, une substance qui est mille fois (pour certains 2000 à 3000 fois) plus sucrée que le saccharose et qui est produite par les fruits de *Thaumatococcus daniellii* Benth. (Fam. des Maranthacées), un arbuste natif de l'Afrique équatoriale de l'Ouest qui produit ses cabosses sur les stolons au ras du sol. Cette substance est utilisée pour la préparation d'édulcorants artificiels de basses calories qui s'ajoutent à la préparation de mélanges de desserts et des gommes à mâcher.

La betterave à sucre

La betterave à sucre est une plante d'origine récente qui a été modifiée il y a 200 ans en Europe par une sélection artificielle particulièrement efficace de la betterave de table (*Beta vulgaris* L. Famille des Chenopodiaceae). La betterave de table est, par contre, d'origine plus ancienne. Les premières preuves de son utilisation sont rapportées par les romains au cours du 5^e siècle av. J.C. À cette époque, l'on consommait les feuilles, et de façon moindre, les racines. Ce n'est

Schéma 1

Évolution de la betterave à sucre (*Beta vulgaris* L.)

Beta maritima (2n = 18) (Espèce sauvage).

16ème siècle
(Europe)

Beta vulgaris (2n = 18) (Betterave de table)
(2-4% sucre)

Fin 18ème - 19ème siècle
(guerres napoléoniennes)

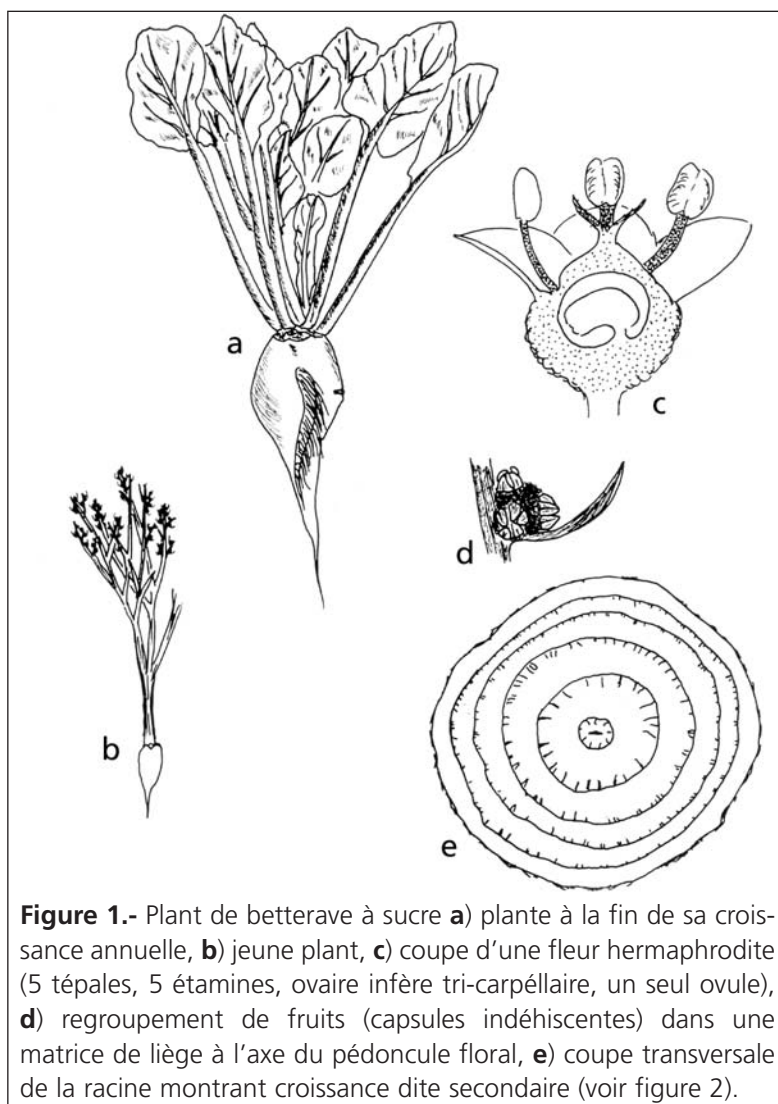
[Margraff-Achard]

Beta vulgaris (2n = 18) (Betterave à sucre)
(12-22% sucre)

qu'à partir de la fin du Moyen Âge, au 13-14^e siècle, que les racines de la betterave de table prennent une place plus importante dans l'alimentation. Au cours du 18^e siècle, plusieurs variétés sont sélectionnées pour obtenir des racines plus développées et l'on constate que celles-ci contiennent une certaine quantité de sucre. En 1747, le chimiste allemand Andreas Margraff établit la composition de ce sucre comme étant du saccharose, similaire au sucre cristallisable obtenu de la canne à sucre qui était à cette époque, la principale source de sucre commercial. Vers 1790, l'agronome français Michel Achard développe avec l'aide du roi de Prusse un programme de sélection artificielle ayant pour but d'augmenter le contenu de sucre des racines de la betterave de table qui ne dépassait guère le 3 % du poids de celles-ci (**Schéma 1**). Le programme est un succès, car, en moins de 10 ans, il obtient des variétés améliorées qui produisent jusqu'à 18 % de saccharose dans leurs racines. En 1801, la première raffinerie de sucre à partir de la betterave à sucre est établie en Silésie. Suite aux perturbations causées par les guerres napoléoniennes sur l'importation de sucre de canne en Europe, la betterave à sucre prendra un essor considérable au cours de la période du règne de Napoléon I. La politique de conquêtes européennes imposée par celui-ci est contrecarrée par l'Angleterre. L'Angleterre impose un blocus naval très efficace qui empêche les importations de sucre de canne des îles antillaises. Napoléon encourage, par des subsides généreux, le développement d'une industrie sucrière locale basée sur la betterave à sucre. L'intérêt pour cette industrie diminue après la bataille de Waterloo, mais est relancée à partir de 1840 grâce au jumelage de la culture de la betterave à sucre avec la production laitière par l'utilisation des feuilles (ensilage) et des résidus (cossettes) de l'extraction des racines pour l'alimentation du bétail. Vers 1860, la culture de la betterave à sucre est pratiquée dans la plupart des régions d'Europe possédant un climat tempéré. À partir de 1890 cette culture prend son essor dans des régions d'Amérique du Nord qui possèdent un climat similaire.

Description de la plante:

Sauf pour la plus grande dimension de leurs racines et le contenu plus élevé en sucre, la plante de betterave à sucre est similaire à celle de la betterave de table. Les deux types de betterave sont classés sous la même sous-espèce, *Beta vulgaris* ssp. *vulgaris* L. et possèdent le même nombre chromosomique ($2n = 18$). Cette espèce est considérée comme une espèce bisannuelle, car elle a tendance à achever sa croissance végétative la première année et sa phase reproductive au cours de la seconde année de son développement. Sous culture, les plantes sont considérées des annuelles car elles sont cueillies au cours de la première année de croissance végétative. Les deux années de développement sont nécessaires pour la production de semences et pour les programmes d'amélioration génétique impliquant l'hybridation. Suite à la germination, une racine pivotante primaire est produite. Du col de cette racine plusieurs feuilles se développent en verticille. À maturité les limbes coriaces et charnues de ces feuilles pourront atteindre jusqu'à 1 m de longueur (**Figure 1**). La croissance exceptionnelle de la racine est établie par un processus de croissance dit "secondaire". L'épaississement de la



racine est le résultat de la formation de plusieurs couches de cambium successives à l'extérieur de la première couche de cambium, élément de base caractéristique d'une racine de croissance normale. Chaque couche de cambium excentrique produit des cellules de xylème et de phloème accompagnées d'un parenchyme de stockage bien développé, qui dans le cas de la betterave à sucre, est composé de cellules riches en saccharose. Une racine de betterave à sucre typique est composée d'une trentaine de ces couches de cambium et son poids moyen est d'environ 800 g, mais peut, dans des cas exceptionnels, peser au-delà de 4 kg (**Figure 2**).

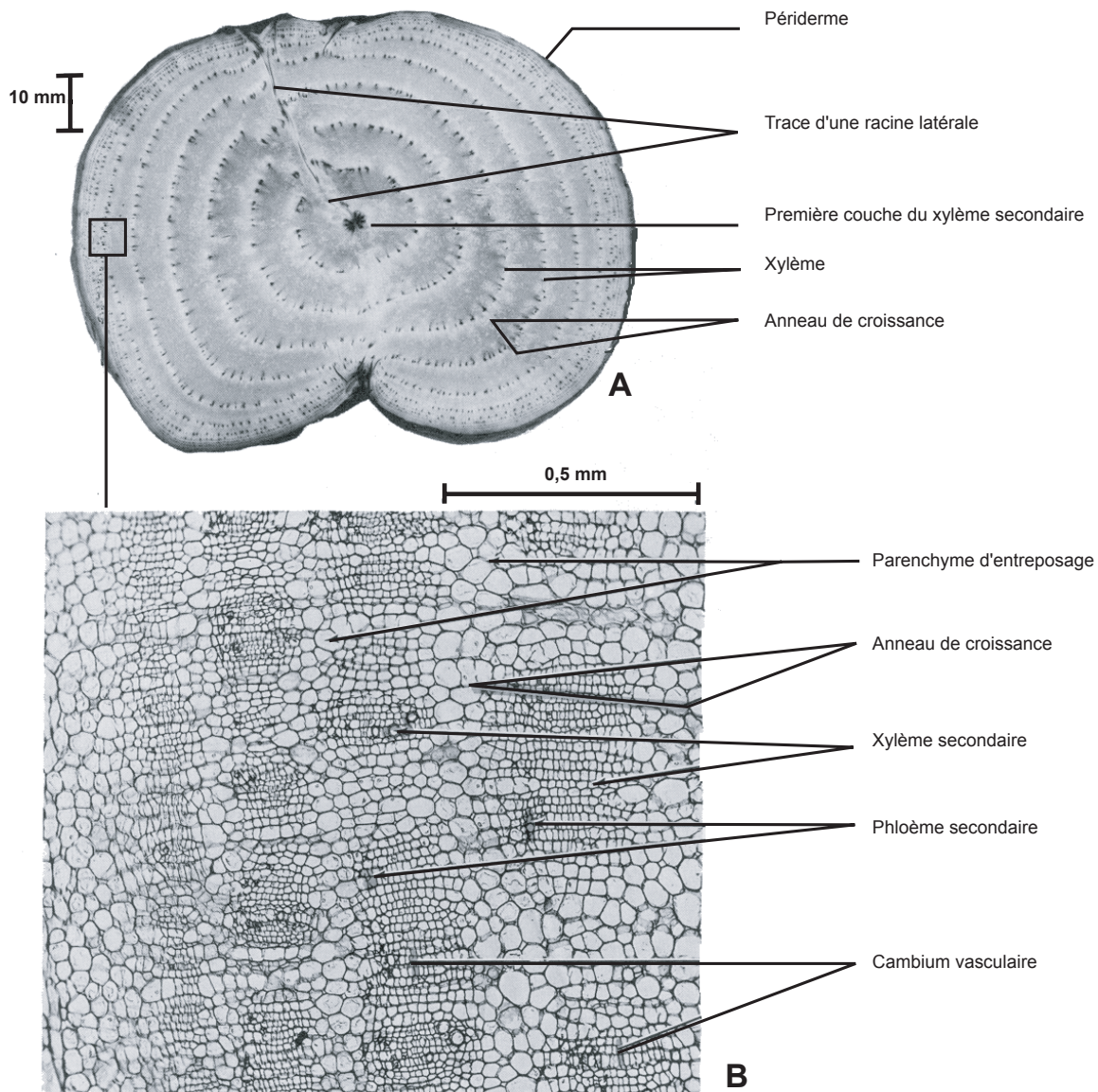


Figure 2 . Coupe transversale d'une racine de betterave à sucre (*Beta vulgaris*) illustrant la croissance secondaire résultant en la formation de plusieurs couches de cambium à l'extérieur du cambium ordinaire. Chaque couche supplémentaire de cambium donne naissance à des cellules de phloème et de xylème ainsi qu'à du parenchyme d'entreposage (figure adaptée de Essau 1977).

La plante allogame produit des fleurs hermaphrodites de petites dimensions pendant la seconde année de croissance. Chez les variétés traditionnelles de betterave à sucre, les fleurs sont regroupées dans une inflorescence par groupes rapprochées de 3-8, à l'axille des branchements secondaires de l'inflorescence. Chaque fleur est composée de 5 tépales (structure unique en lieu de sépales et pétales), 5 étamines et un ovaire infère à trois carpelles possédant un seul ovule. La reproduction est par fécondation croisée. Lors de la formation des fruits,

le périanthe des fleurs s'élargit et devient fibreux (structure semblable au liège) enrobant en une unité les fruits des diverses fleurs du groupe axillaire (**Figure 1**). Ces fruits regroupés, trop difficiles à séparer les uns des autres, sont utilisés comme "graines multigerms" pour les plantations de nouveaux champs de betteraves. Afin d'éviter une trop grande densité rapprochée de plantules issues de la germination de ces graines "multigerms", il est nécessaire de clairsemer les plantules par divers moyens, ce qui occasionne des coûts de production additionnels importants. Pour éviter cet inconvénient, des variétés "monogerms" ont été sélectionnées au cours des dernières décennies. Les inflorescences de ces variétés produisent une seule fleur par groupe axillaire et donc une seule graine par unité.

Évolution de la betterave à sucre :

Les études de biosystématique, appuyées par les analyses de biologie moléculaire plus récentes, démontrent sans ambiguïté que l'espèce ancestrale des deux formes de betterave cultivées est *Beta vulgaris* ssp. *maritima* (L.) Thell (2n=18), une espèce spontanée de rivage distribuée le long des côtes du nord de la mer Méditerranée ainsi que le long de la côte atlantique allant du sud du Portugal aux pays scandinaves. Les feuilles de *B. vulgaris* ssp. *maritima* ressemblent à celles des formes cultivées et étaient probablement déjà utilisées pour l'alimentation au cours de l'antiquité par les peuples habitant le bassin méditerranéen. Par contre, le système racinaire est peu développé et les racines sont fibreuses et peu attrayantes comme nourriture. L'espèce spontanée est adaptée à la salinité du fait de sa distribution sur les sols riches en NaCl et de son exposition aux embruns marins. Cette tolérance à la salinité s'est transmise aux formes cultivées et certaines variétés sélectionnées peuvent être cultivées sous des conditions de salinité qui ne sont pas tolérées par les autres espèces cultivées.

Écologie et méthodes de cultures :

La culture de la betterave à sucre est adaptée aux climats tempérés sous des conditions de pluviométrie d'au moins 600 mm de précipitations (ou arrosage d'appoint), bien réparties pendant la période de croissance. La production est plus élevée quand les plantations sont établies sur des sols neutres à légèrement acides, bien structurés, enrichis en éléments nutritifs et bien drainés. Au fait, cette culture est particulièrement exigeante quant aux conditions nécessaires pour atteindre des productions maximales de 60 TM et plus de racines par hectare. Bien que certaines variétés soient tolérantes à des taux de salinité élevés, le potentiel de production maximale n'est atteint que sous les conditions optimales décrites ci-dessus.

La culture de la betterave à sucre, établie sur une base annuelle, s'étale sur une période allant de 5-6 mois (cultures des régions plus méridionales) à environ 3 mois (variétés hâtives des régions plus septentrionales). La préparation adéquate de la terre pour les semailles est importante pour la germination et le développement des jeunes plants. La culture de la betterave à sucre est hautement mécanisée et spécialisée. La terre est préparée en profondeur et aérée au moyen de charrues à disques et de brise-mottes. Des semeuses couplées à des applicateurs d'engrais permettent de placer les graines (et l'engrais) le long de sillons espacés entre 60 et 80 cm. Après la germination, les plantules excédentaires (en particulier pour plantations de variétés "multigerms") sont éliminées au moyen de clairsemeuses électroniques. Une distance de 40-50 cm est établie entre les plantules sur le sillon. Cette étape permet de délimiter l'espace d'occupation de chaque plant afin que la racine puisse se développer sans entrave et sans compétition entre les plantes. Le contrôle des mauvaises herbes est particulièrement important pendant la croissance des plantules et ce, jusqu'à que les couronnes de feuilles des plantes recouvrent complètement le terrain. Sous ces conditions les racines se développeront de façon optimale en une seule masse avec un ratio volume: surface élevée. Vers la fin de l'été ou au début de l'automne, à mesure que les jours raccourcissent, il y a augmentation de concentration de saccharose dans les racines. Cette concentration est analysée périodiquement au moyen d'un réfractomètre pour établir la date optimale pour la récolte. Quand le réfractomètre indique une valeur de réfraction de 20-22 unités Brix, l'on procède au décolletage *in situ* des racines au moyen de scies circulaires horizontales placées sur une décolleteuse mécanique. Le collet et les feuilles sont utilisées pour la préparation de l'ensilage destinée à l'alimentation de vaches laitières. Les racines sont retirées du sol au moyen de fourches placées à l'avant de convoyeurs mécaniques et transportées par camion à la raffinerie où elles sont entreposées pour l'extraction du saccharose. L'entreposage peut s'étaler sur plusieurs

semaines durant lesquelles il est important de bien aérer les piles de racines afin d'éviter des hausses de températures qui pourraient produire la fermentation indésirable ou l'augmentation de l'activité des invertases endogènes de la betterave, ce qui aurait pour résultat de transformer irréversiblement une partie du saccharose en sucres non-cristallisables.

Amélioration génétique de la betterave à sucre :

Au cours du 19^e siècle, les programmes de sélection de la betterave à sucre étaient orientés vers une augmentation de la teneur en saccharose et les résultats furent spectaculaires. Vers 1890, les racines des variétés utilisées en culture produisaient déjà 20 à 22 % de saccharose sous des conditions de climats, de sols et de pratiques agricoles favorables. Les améliorations génétiques à partir de 1920 ont permis de produire des variétés de plus en plus productives. Cette augmentation de la production est due, en partie, à la sélection de variétés résistantes aux maladies fongiques, bactériennes et virales, mais aussi à une amélioration des pratiques agricoles et à une mécanisation accrue des étapes de la culture allant des semences à la moisson. De nos jours, les plantations de betterave en Europe et en Amérique du nord peuvent produire au-delà de 80 TM de racines par hectare ; le record absolu de 140 tonnes par hectare ayant été atteint dans une ferme à Salinas dans la vallée centrale de la Californie. A partir de 1960 la sélection et l'introduction de variétés certifiées "mono-germes" ont facilité les pratiques agricoles et réduit considérablement le coût d'exploitation de cette culture.

Extraction et raffinage du sucre de betterave et de canne:

Plusieurs étapes sont nécessaires pour extraire et raffiner le sucre des racines de betterave et de canne à sucre. Excepté pour l'étape d'extraction initiale, les procédures sont similaires pour l'obtention et le raffinage de saccharose provenant de ces deux plantes. Le schéma présenté à la **figure 3** résume les différentes étapes de ce processus à partir de la canne.

Les betteraves entreposées sont lavées et brossées mécaniquement lors de leurs transports par convoyeur à l'intérieur de la raffinerie. Les racines sont coupées mécaniquement en fines lanières appelées cossettes. La canne coupée est lavée et broyée par des rouleaux en série avec l'ajout d'eau chaude et le jus est chauffé en présence d'agents, tels que du carbonate de calcium, l'hydroxyde de calcium, le dioxyde de carbone et le SO₂, qui précipitent les protéines et autres substances secondaires (**Figure 3**).

Les résidus solides de la canne broyée constituent le bagasse qui est séché et utilisé de diverses façons. Dans les pays producteurs de canne, une partie importante du bagasse est destinée à produire l'énergie nécessaire pour faire fonctionner la raffinerie. C'est le cas des "centrales azucareras" de Cuba et d'autres pays du tiers-monde où près de 70% du bagasse produit est utilisé pour alimenter les chaudières qui permettent d'actionner la machinerie et de chauffer l'eau. Le bagasse sert aussi de matière première pour la fabrication d'un papier de qualité supérieure, comme couche de protection "mulch" pour protéger les sols contre l'érosion et la dessiccation, et comme matière première pour la production industrielle d'alcool.

Les cossettes de betterave à sucre sont aussi trempées dans de l'eau chaude dans des cuves en présence des agents précipitants. Le saccharose est extraite et, par la suite, la solution sucrée est filtrée et soumise à une évaporation initiale par ébullition suivie d'une évaporation à vide jusqu'à formation d'un sirop présentant des signes de cristallisation initiale. Ce sirop, qui reçoit le nom de masse cuite, est soumis à une nouvelle évaporation jusqu'à ce que le processus de cristallisation soit avancé. Par la suite, les cristaux de sucre sont séparés du liquide par centrifugation. Le liquide, qui contient encore de la saccharose et une petite quantité de sucres non-cristallisables, constitue les mélasses. Les mélasses sont rajoutées à la masse cuite pour une seconde extraction mais, peuvent aussi être utilisées directement pour l'industrie alimentaire et pour l'alimentation humaine directe. Dans le cas du raffinage de la canne à sucre, une proportion importante de la mélasse est utilisée pour la fabrication du rhum. Le sucre de canne produit dans les pays du tiers-monde est généralement exporté en forme de sucre brun et le raffinage est effectué par la suite dans les raffineries situées dans les pays importateurs. Le sucre cristallisé brun est re-dissout en sirop dense et centrifugé à nouveau pour séparer d'autres substances chimiques non-désirées. Le liquide est à nouveau filtré en présence d'agents de blanchissement tels que le SO₂ et CaCO₃ et à travers différents types de filtres fins (os broyés, bentonite). Ce processus doit être répété jusqu'à

1. La canne à sucre
entre dans le moulin

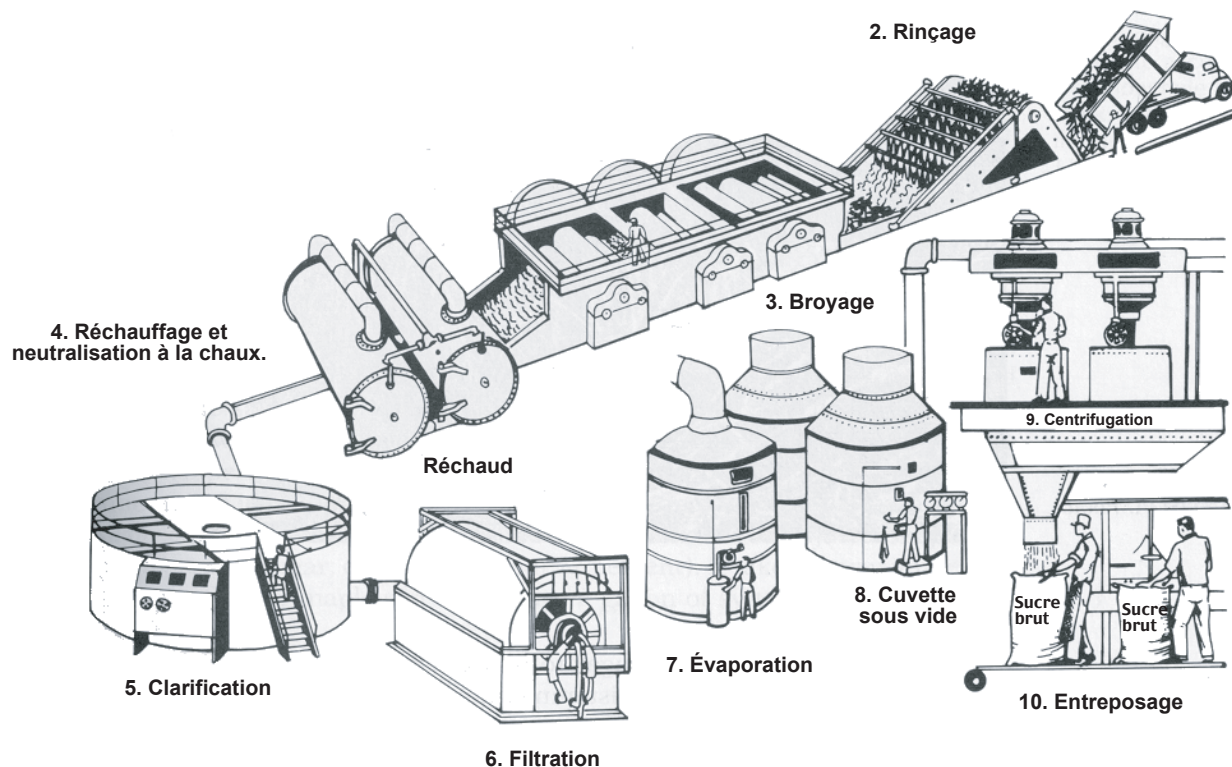


Figure 3.- Les principales étapes de la transformation de la canne à sucre. Les chaumes de canne sont apportées à la centrale où elles sont lavées et broyées entre des séries de rouleaux rapprochés. Le jus extrait est bouilli afin de détruire les microorganismes et de la chaux est ajoutée pour réduire l'acidité du jus et éclaircir le jus. Le jus est décanté et filtré du dépôt « boue » qui est précipité. Le jus est ensuite chauffé et, par la suite, évaporé à vide causant ainsi la cristallisation. Cette masse est centrifugée afin de séparer les cristaux de sucre brun brut de la mélasse et de la masse cuite non cristallisée. Cette dernière étape est recommencée plusieurs fois afin d'obtenir finalement le sucre blanc cristallisé (adapté de Simpson & Ogorzaly 1995).

obtenir une cristallisation d'un sucre blanc. Le sucre granulé est obtenu en cristallisant le sirop sur des pannes suivi d'une centrifugation à température élevée. Le sucre en poudre est préparé par broyage du sucre blanc cristallisé avec l'ajout d'amidon de maïs pour éviter le compactage. Le sucre en cubes est préparé à partir de moulage de sucre granulé légèrement humidifié au préalable.

La pectine est un produit secondaire issu de l'extraction du sucre de betterave qui est utilisé pour des fins industrielles. Les cossettes, après l'extraction de la saccharose, contiennent 20 % de pectine qui est utilisée pour la préparation de confitures et pour les colles. Les cossettes sont séchées et utilisées comme supplément pour l'alimentation des vaches laitières.

Statistiques de production pour 2001 (FAOSTAT, révisé)

La production mondiale de betterave à sucre en 2001 était d'environ 245 MTM. Cette production était répartie dans 53 pays et couvrait une superficie d'environ 6.0 millions d'hectares. La quantité de sucre brun (non raffiné) issue de cette production était d'environ 39,2 MTM. Les pays producteurs les plus importants étaient, par ordre décroissant: la France (26,7 MTM de betterave; 4,26 MTM de sucre brun), l'Allemagne (24,4 MTM; 3,9 MTM), les États-Unis (23,4 MTM; 3,9 MTM), l'Ukraine (15,5 MTM; 3,1 MTM), la Turquie (14,5 MTM, 3,0 MTM), la Fédération Russe (14,5 MTM, 2,9 MTM) et la Chine (10,9 MTM; 1,3 MTM). Le **Canada** était placé **33^{ème}** avec une production de betterave de **0,821 MTM** (soit **89 000 TM de sucre brun**). Le rendement par hectare de champs de betterave se situait entre 6 TM et 66 TM, avec une moyenne de 39,2 TM/ha. Les pays indus-

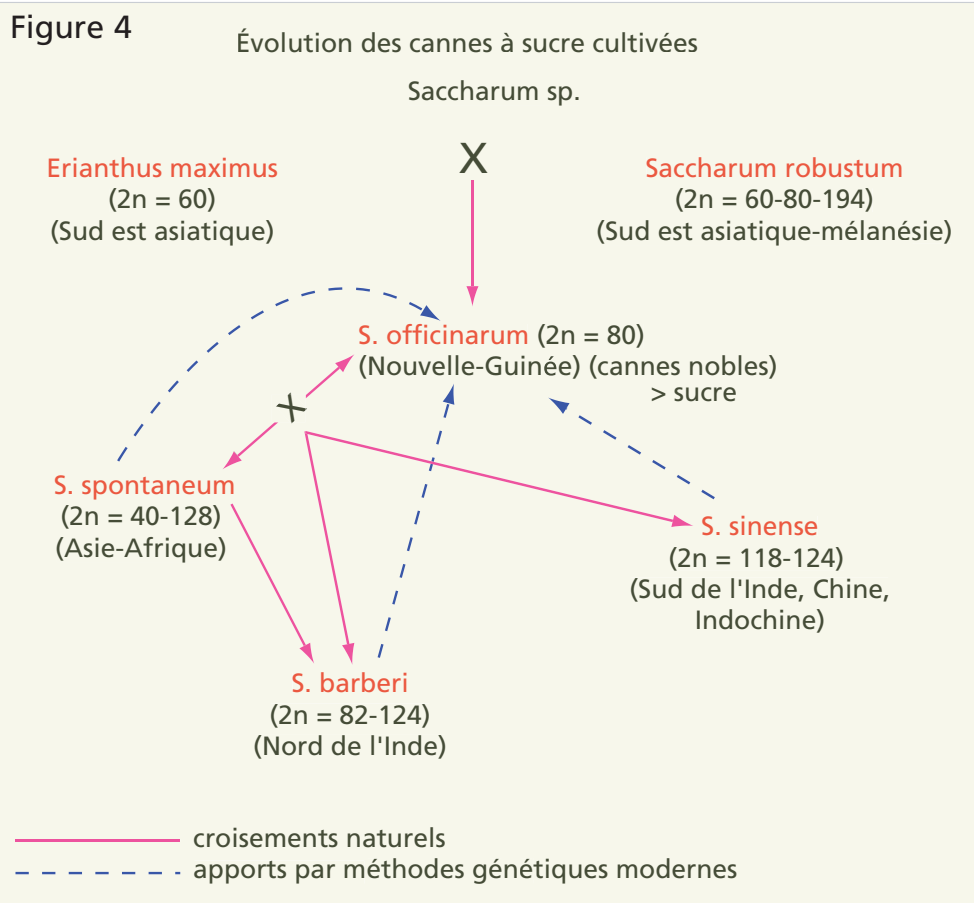
trialisés d'Europe occidentale produisaient les plus hauts rendements alors que les pays du Tiers-Monde comme l'Équateur avaient les rendements les plus bas. Les généticiens opinent que les rendements de la betterave à sucre pourraient être aussi élevés que 200 TM/Ha si des programmes d'amélioration génétique et de nouvelles pratiques améliorées de culture étaient mis sur pied. D'après les généticiens et les agronomes spécialistes, le potentiel de production de cette plante est loin d'être atteint.

La canne à sucre

Par tradition, la canne à sucre cultivée reçoit le nom scientifique de *Saccharum officinarum* L., car cette espèce a été la première à être utilisée et cultivée par l'Homme en Asie du Sud-Est. Par contre, toutes les variétés de canne à sucre cultivées présentement de façon commerciale, ou qui l'ont été lors des premières phases de l'expansion de cette culture à partir des régions d'origine, sont des hybrides interspécifiques complexes. Les variétés les plus anciennes étaient déjà des hybrides naturels entre *S. officinarum* et 2 à 5 taxons différents de *Saccharum*, dont deux seulement peuvent être classés comme des espèces strictement spontanées. Tous les taxons de *Saccharum* impliqués sont des graminées vivaces appartenant à la tribu *Andropogoneae* de la famille des Poacées. Tous ces taxons sont des polyploïdes complexes contenant un très grand nombre de chromosomes de petites dimensions, et à l'exception de *S. officinarum*, montrent une très grande variation du nombre chromosomique de leurs caryotypes. Le nombre chromosomique de base des taxons de la tribu *Andropogoneae* étant de 5, les caryotypes des espèces de *Saccharum* représentent des séries multiples du complément de base qui varient, dépendant des taxons, entre 8X et 40X.

Une des deux espèces spontanées, *S. robustum*, possède une vaste distribution le long des rivières dans les régions tropicales du sud et du sud-est de l'Asie. Elle a été impliquée dans l'évolution de *Saccharum officinarum* ($2n = 80$) qui serait un amphipolyploïde résultant d'un croisement entre *S. robustum* et *Erianthus maximus* (Figure 4). *Saccharum officinarum*, originaire de Nouvelle-Guinée, est considérée une "canne noble", car elle est la seule à synthétiser et accumuler de la saccharose dans les tissus parenchymateux de ces tiges. Cette espèce se serait croisée spontanément avec l'espèce *S. spontaneum*, une espèce sauvage de morphologie et physiologie très variable, distribuée sur de vastes territoires dans les

Figure 4



régions tropicales et subtropicales de l'Asie et de l'Afrique. Les trois taxons, *S. barberi*, *S. sinense* et *S. edule* sont des taxons d'origine plus récente qui auraient évolué de croisements naturels entre *S. officinarum* et des populations subtropicales de *S. spontaneum* lors de la migration vers le nord de formes cultivées de *S. officinarum* (**Figure 4**). Il est difficile d'établir avec certitude l'évolution de ces taxons à cause de la grande diversité de formes et la variabilité du nombre chromosomique parmi les espèces impliquées. Les analyses biochimiques plus récentes démontrent la grande similitude génétique entre les formes et variétés des diverses espèces cultivées. Les croisements effectués lors de programmes d'amélioration génétique à partir de 1920 (principalement à Java (Indonésie) et aux îles Barbade (Caraïbes)) ont intégré les deux espèces spontanées et des cultivars traditionnels des quatre taxons cultivés. Le but principal de ces programmes a été d'augmenter le rendement de saccharose par unité de surface, et surtout, de produire des variétés résistantes aux nombreuses maladies fongiques, bactériennes et virales qui affectent la productivité des taxons de *Saccharum* de façon différentielle (**Tableau 1**). En combinant les caractéristiques de résistance aux maladies particulières à chaque taxon, il a été possible

Tableau 1. Résistance et susceptibilité aux maladies fongiques, bactéries, virus et nématodes chez les espèces de canne à sucre (<i>Saccharum</i> sp.) utilisées dans les programmes d'amélioration génétique*						
(S = susceptible; R = résistant; I = résistance intermédiaire; SR= variable pour clons de la même espèce; S(R) = plus de clons susceptibles que résistants)						
Organisme pathogène	Espèce de <i>Saccharum</i>					
	<i>officinarum</i>	<i>robustum</i>	<i>spontaneum</i>	<i>sinense</i>	<i>barberi</i>	<i>edule</i>
champignons						
Rouille tige & feuille (<i>Ustilago scitaminea</i>)	R+++	R+	S	S	S	S
Pourriture de la tige (<i>Colletotrichum</i> sp.)	S	I	R	S	S	S
mildew (<i>Scleroscopa sacchari</i>)	S	S	R	I	S(R)	S
bactéries						
Gommose (<i>Xanthomonas vasc.</i>)	R(S)	S	R	R	R	S
brulure de la feuille (<i>Xanthomonas albi.</i>)	I	S	R	I	S	I
Virus						
virus du mosaïque Sereh S(R)	S S(R)	S R	R(S) S(R)	S S(R)	S S	S
Nématode de la canne	S	S	R	S	S	S
* Stevenson 1965						

de produire de nouvelles variétés résistantes qui peuvent être cultivées sur une période de temps plus longue dans différentes régions possédant des climats tropicaux et subtropicaux humides.

Description de la canne à sucre:

Toutes les espèces de *Saccharum* sont des graminées vivaces de longue vie qui ont la possibilité de se propager végétativement à partir de bourgeons situés aux entre-nœuds des tiges et sur les rhizomes souterrains. Ces bourgeons produiront des racines et des tiges primaires qui se développeront pour atteindre entre 2,5 m et 4 m de hauteur dépendant des taxons et des variétés utilisées. *S. robustum* peut atteindre jusqu'à 10 m de hauteur alors que certaines formes de *S. spontaneum* n'atteignent qu'entre 60 cm et 2,5 m de hauteur. Les feuilles sont produites aux nœuds des chaumes au fur à mesure de la croissance. La floraison est induite par une diminution de la photopériode. Une inflorescence est produite à l'apex des chaumes fertiles. Cette inflorescence est une panicule fragile et soyeuse comportant de nombreux axes aux rachis minces et flexibles. Deux épillets sont présents à chacun des nœuds des rachis. Chaque épillet comprend deux fleurs hermaphrodites dont la fleur inférieure est généralement stérile. Des longues soies, au nombre de 6 à 8, sont disposées en forme de verticille à la base de chaque épillet donnant une allure soyeuse à la panicule. Ces soies jouent un rôle lors de la dispersion des graines légères par le vent. La structure des fleurs est semblable à celles d'autres graminées, mais de dimension plus réduite. Elle comporte un ovaire uni-ovulé, un stigmate bifide et plumeux, trois étamines et deux glumelles (lemna et palea). Le lemna est absent des fleurs de *S. officinarum* (Figure 5).

La floraison des plantes cultivées n'est pas désirable du fait qu'elle soutire une partie de l'énergie nécessaire à la croissance végétative de la plante et à la production de saccharose. La floraison est réduite et parfois absente chez les plantes cultivées dans les régions tropicales. Par contre, celle-ci est induite par une diminution de la photopériode lorsque les plantations sont situées ou plantées dans les régions subtropicales. Il est possible de supprimer la floraison en appliquant certaines substances chimiques qui, comme l'hormone synthétique diquat, inhibent la formation du primordium floral. Dans certaines plantations de canne à sucre d'Hawaï, on expose les plantes à de courtes périodes de lumière artificielle pendant la nuit afin d'inhiber l'induction de la floraison.

Origines de la culture de la canne à sucre :

Il n'y a pas de preuves concrètes qui permettent de dater les origines de l'utilisation et la culture de la canne à sucre. La présence de *Saccharum officinarum* en Nouvelle-Guinée et le fait que les peuples indigènes de cette région consommaient le jus sucré des tiges et utilisaient les tiges pour délimiter des enclos autour de leurs habitations, nous laisse croire que la canne était utilisée comme aliment depuis des temps très anciens. Des plantes de *Saccharum officinarum* ont dû être transportées dans différentes régions d'Asie du Sud relativement tôt, car des formes hybrides de canne à sucre impliquant *S. officinarum* étaient cultivées en Inde à partir du 3^e millénaire avant J.C. Toujours en Inde, des méthodes primitives d'extraction et de raffinage du saccharose de canne étaient utilisées par les peuples de la civilisation Harrapan (3,800 A. P.). Ce peuple avait déjà maîtrisé une méthode pour produire des sirops sucrés et concentrés (jaggeri) à partir dans la sève du dattier et d'autres espèces de palmiers. Alexandre le Grand, lors de son retour de l'Inde en 326 av J.C. fait mention d'une sorte de miel aux cristaux sucrés produit de tiges de certaines plantes ressemblant à des roseaux. Mais la canne à sucre, ne poussant que dans les régions asiatiques à climat chaud ne fut importée que vers l'année 641 de notre ère dans la région du Delta du Nil. L'expansion de l'Islam dans la région méditerranéenne permit son introduction et sa culture dans le sud de l'Espagne vers l'année 711 de notre ère. L'industrie du sucre de canne devint importante dans le sud de l'Espagne où, vers 1 150 de notre ère, près de 30 000 hectares étaient recouvertes de canne à sucre. Les Espagnols et Portugais ont, par la suite, introduit la culture de canne à sucre aux Iles Madeiras vers 1 420, et 40 ans plus tard aux îles Canaries et aux Açores (en 1 460). Jusqu'au 16^e siècle, le miel était la principale source de sucre en Europe. Le peu de sucre de canne qui était importé et commercialisé, vu son prix élevé, était réservé à la noblesse. Ce sucre était considéré un luxe et un médicament. Ce n'est qu'après la découverte de l'Amérique, que la culture de la canne à sucre fut introduite dans de nouvelles régions possédant le climat favorable à sa production. Des plantes de la variété "Criolla" de canne à sucre, provenant de plantations espagnoles, furent introduites pour la première fois sur l'île Hispaniola (République Dominicaine et Haïti) par Christophe Colomb lors

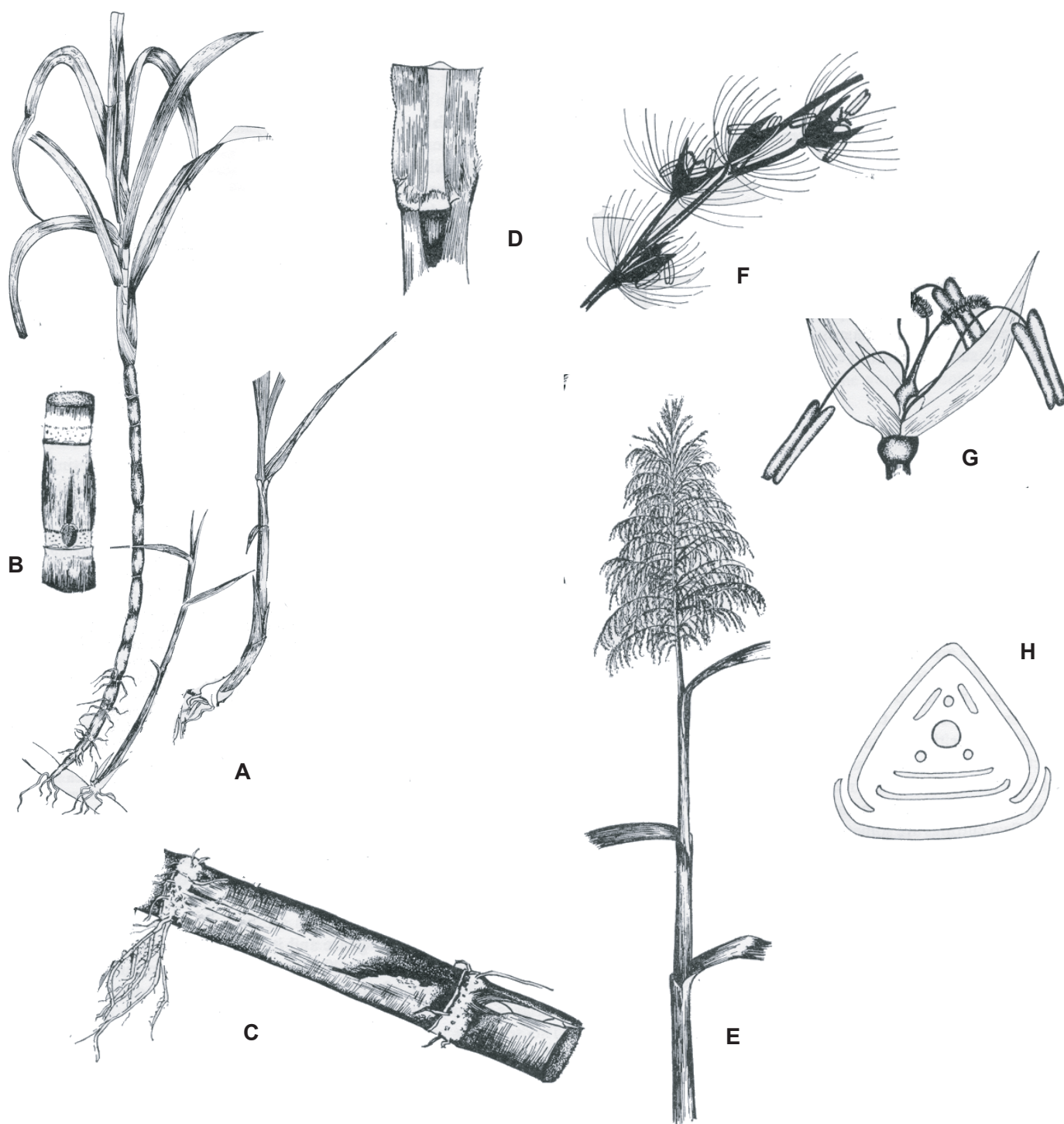


Figure 5. *Saccharum cv.*: Canne à sucre. **A.-** Tige se développant à partir de bourgeon végétatif; **B.** Portion d'un entre-noeud montrant un bourgeon végétatif; **C.-** «Semence» végétative et bourgeon «germe»; **D.-** Insertion de la feuille sur la tige, limbe, ligule, gaine et bourgeon du noeud, **E.** Inflorescence; **F.-** Portion de l'inflorescence, sètes; **G.-** Épillet; **H.-** Diagramme floral.

de son second voyage en 1493, mais la plantation fut détruite. Une seconde introduction en 1506 permit une première récolte et une expansion de sa culture à partir de 1509. Les conditions climatiques de la région des Caraïbes furent favorables à la croissance de cette plante qui prit une telle importance au cours des deux siècles suivants qu'elle justifia la pratique de l'esclavage afin de pourvoir à la demande de main d'œuvre nécessaire aux laboureurs agricoles et à la production de sucre.

La variété Criolla, une variété de *S. barberi*, originaire de l'Inde et introduite en Espagne par les Arabes, fut la première et unique variété utilisée en Amérique jusqu'en 1766, époque où les plantations américaines furent décimées par des maladies bactériennes, fongiques et virales. Cette variété fut remplacée par la variété "Otaheite" ou "Bourbon", qui avait été ramassée par le navigateur Bougainville en Indonésie. Elle avait transité par les îles de la Réunion et l'île Maurice (Océan Indien) avant d'être introduite successivement dans les îles des Caraïbes, au Mexique, au Brésil, et dans les états du sud des États-Unis. Entre 1840 et 1860, cette variété devint à son tour susceptible aux maladies virales et à la gommose bactérienne de la racine dans les différentes régions d'Amérique Centrale et du Brésil où la canne était cultivée. La variété résistante "Cheribon" provenant de l'île de Java en Indonésie la remplaça avec succès et fut utilisée jusqu'à la fin du 19^e siècle.

À partir de 1888, un programme ambitieux de sélection et d'hybridation de la canne à sucre prend son essor dans deux stations expérimentales sur l'île de Java (Indonésie) et aux Barbade (Caraïbes). L'on procède à des croisements dirigés qui impliquent les deux espèces spontanées *S. spontaneum* et *S. robustum* ainsi que des variétés de *S. officinarum* (canne noble). Ces croisements sont effectués dans le but d'introduire des gènes de résistance aux plus importantes maladies qui attaquent la canne à sucre. Ces programmes de "nobilisation" produisent de nouvelles générations d'hybrides, tels que la POJ 2878, et la POJ 2725, qui remplaceront les variétés traditionnelles utilisées jusqu'à cette période. Du fait que cette culture vivace est associée aux climats chauds et humides à longueur d'année, elle est soumise à des conditions propices pour la prolifération d'agents bactériens et fongiques et ce, tout au long de l'année. La probabilité de mutations de ces souches augmente considérablement dû au nombre élevé de générations produites continuellement sous ces conditions. Le but principal des programmes d'amélioration modernes est de produire de nouvelles variétés résistantes par le biais de croisements interspécifiques complexes, afin de remplacer les variétés qui deviennent susceptibles aux souches bactériennes, fongiques et virales à cause des mutations qui modifient leurs virulences. Au cours des dernières décennies, les programmes d'amélioration génétique se sont aussi orientés vers l'obtention de variétés commerciales qui synthétisent des taux plus bas d'invertases endogènes. L'objectif est de réduire les pertes en saccharose qui se produisent pendant la période d'exposition des cannes coupées qui précède le broyage à la centrale.

Écologie et méthodes de culture de la canne à sucre :

La canne à sucre est une plante d'origine tropicale et subtropicale qui possède une physiologie photosynthétique en C₄. Elle est cultivée généralement dans ces régions entre les latitudes 35°S et 35°N. Sa croissance végétative est favorisée par des températures élevées, entre 26° et 34° C, et un fort ensoleillement. Sa croissance est interrompue à des températures inférieures à 20°C et elle ne tolère pas le gel. Lors des plantations, la température optimale pour la germination des bourgeons végétatifs est de 31° C et celle-ci est interrompue à des températures inférieures à 22° C. À moins d'irrigation artificielle, le régime de pluies doit être constant et d'un minimum de l'ordre de 1500 à 1800 mm durant la période de croissance végétative. La culture de la canne est favorisée sur des sols argileux qui possèdent un drainage de bon à satisfaisant. La productivité de la canne est améliorée par l'ajout d'engrais riches en phosphore et en potassium. Les sols neutres (pH 6 à 7) sont les plus favorables et la production est réduite lorsque le pH des sols est supérieur à 7.5 ou inférieur à 5.8.

La propagation végétative est favorisée pour établir de nouvelles plantations de canne à sucre. L'on utilise comme "semence végétative" des portions de tiges comportant deux ou trois bourgeons qui sont distribuées le long de sillons. Celles-ci seront recouvertes de terre par la suite. La germination est favorisée par l'humidité et des températures entre 28 et 32° C. Le développement végétatif de la première année de culture de la canne s'établit sur une période oscillant entre 12 et 18 mois et la croissance des plantes peut atteindre de 3 à 4 mètres pendant cette période. Dans les régions sous-tropicales, l'accumulation de saccharose dans les tiges des plantes est favorisée par la diminution de la photopériode à l'automne et la coupe s'effectue vers la fin de cette saison.

Dans les régions tropicales, c'est la période de la saison relativement sèche qui favorise la production de sac-

charose. Comme dans le cas de la culture de betterave, on mesure la quantité de saccharose de la tige à l'aide d'un réfractomètre. On détermine ainsi la période la plus favorable pour la coupe de la canne. Celle-ci peut être effectuée soit manuellement à la machette dans les pays du Tiers-Monde et les régions montagneuses, ou soit de façon mécanisée au moyen de moissonneuses spécialisées dans les pays industrialisés et les surfaces plates. La méthode de coupe traditionnelle consiste à tailler les chaumes très près du sol et, par la suite, couper la couronne de feuilles située dans la portion apicale des tiges. La méthode dite "australienne" consiste à mettre le feu aux plantations à couper et de procéder seulement à la coupe de la base des chaumes, les feuilles ayant été préalablement brûlé. Il est surprenant de constater que les champs de canne, pourtant verts, brûlent très facilement les jours sans pluies lorsque les conditions de vents sont favorables. La méthode australienne est favorisée quand la coupe est mécanisée.

Les cannes sectionnées doivent être ramassées et transportées rapidement, après la coupe, à la raffinerie afin d'être broyées pour en extraire le saccharose. Si les cannes sont laissées dans les champs, la température élevée activera les invertases endogènes de la plante qui agiront sur le saccharose et transformeront une partie de celui-ci en sucres non-cristallisables. Cette transformation, qui est irréversible, peut représenter une perte importante de saccharose car une période d'attente de 2 à 3 jours peut déterminer une diminution de 50 % de saccharose par rapport à un potentiel de rendement de 8 à 14 %. La perte peut être plus élevée dans le cas d'une coupe par la méthode australienne, car la présence de cendres (couleur noir-gris) fait augmenter la température ambiante et, en conséquence, l'activité enzymatique des invertases.

Suite à la coupe, de nouvelles tiges aériennes se développeront à partir des bourgeons localisés dans la partie souterraine des tiges et des rhizomes. Les plantes ainsi produites seront moissonnées à nouveau chaque année à la même époque pendant une période variant entre 3 ans et un maximum de 10 ans. Un labourage suivi de nouvelles plantations sont nécessaires lorsque la production diminue à cause de la présence de maladies fongiques, bactériennes ou virales qui tendent à devenir plus virulentes avec le temps. Il est coutume d'établir des rotations de culture ou une période de jachère d'un an ou deux afin de permettre l'éradication des spores, bactéries ou virus qui pourraient demeurer au sol après la dernière moisson.

Statistiques de Production pour 2001 (FAOSTAT, révisé)

La production mondiale de canne à sucre en 2001 était estimée à environ 1, 255 MTM (canne coupée recensée), répartie dans 104 pays sur environ 19,4 millions d'hectares. La production de sucre non-raffiné (sucre brun) extrait de ces cannes était estimée à environ 88,3 MTM. Les principaux pays producteur étaient: le Brésil (339,1 MTM de canne; 15,9 MTM de sucre brun), l'Inde (286,0 MTM ; 14,3 MTM), la Chine (79,7 MTM ; 4,2 MTM), le Pakistan (43,6 MTM; 3,1 MTM), l'Australie (31,0 MTM ; 5,6 MTM), la Colombie (33,4 MTM, 4,3 MTM) et Cuba (35 MTM; 3,9 MTM). Le rendement moyen par hectare était de 65,2 TM et variait, suivant les pays, entre 122 TM et 0,9 TM par hectare. La conversion de poids de canne en poids de sucre est difficile à faire, car le % de sucre de la canne varie selon la variété, les conditions de croissance, la qualité du sol, le climat et la rapidité avec laquelle la canne est coupée et broyée pour l'extraction du sucre. Il est estimé que la concentration de sucre peut varier entre 4-5% dans les conditions les moins favorables et 15% dans les meilleures conditions. Pour calculer approximativement et globalement la production de sucre extraite de la canne coupée, les experts opinent qu'il faut établir un rendement moyen de 7%. Si l'on considère ce taux de rendement, la production de sucre en 2001 était approximativement de 88,3 MTM, ce qui correspond de près à la somme des productions de sucre brun raffiné par les pays producteurs de canne à sucre.

Références:

- Anonyme (1979) Brazil running on alcohol. *Nature* 282: 550-551.
- Bellwood, F. S. (1980) The people of the Pacific. *Scientific Amer.* 253 (5): 174-185.
- Brown, L. R. (1980) Food and fuel: New competition for the world's cropland. *Worldwatch* Institute, Washington D.C., 453 p.
- Chambers, R. S. *et al.* (1979) Gasohol: does it run or does it produces positive energy ? *Science* 206: 789-795.
- Doney, D. L. *et al.* (1990) Genetic enhancement in *Beta vulgaris* for disease resistant using wild relatives : a strong case for the value of genetic conservation. *Econ. Bot.* 44(4): 445-451.
- Evans, L. T. (1980) The natural history of crop yield. *Amer. Sci.* 68(4): 388-397.
- Fauconnier, R. & Bassereau, D. (1979) La canne à sucre. Maisonneuve & Larose, Paris. 563 p.
- Gupta, S. C. *et al.* (1978) Morphology of Sorgo-*Saccharum* hybrid derivatives. *Amer. J. Bot.* 65(9): 936-942.
- Heiser, C. B. (1990) Seed to civilization: The story of food. Harvard Univ. Press, Cambridge , Mass. New Edition. Chapitre 6: 111-116.
- Hopkinson, C. S. *et al.* (1980) Net energy analysis of alcohol production in sugar cane. *Science* 207: 302-304.
- Humbert, R. P. (1967) The growing of sugar cane. Elsevier. New York. 745 p.
- Janick, J. *et al.* (1988) Plant Science: An introduction to world crops, 4ème édition . Freeman, San Francisco. pp. 462-463; pp. 465-467.
- Marzola, D. L. & Bartolomew, D. F. (1979) Photosynthetic pathway and biomass energy production. *Science* 205: 555-558.
- McGinnis, R. A. (1957) Beeet-sugar Technology . Reinhold Publ. Co. New York. 765 p.
- Nair, M. W. (1973) Cytogenetics of *Saccharum officinarum*, *S. spontaneum* and *S. officinarum* x *S. spontaneum* hybrids. *Cytologia* 38: 35-43.
- Ochse, J. J. *et al.* (1961) Tropical and sub-tropical agriculture. The MacMillan Co. New York. Vol. 2: pp 1197-1259(sugar cane).
- Price, S. (1963) Cytogenetics of modern sugar cane. *Econ. Bot.* 17: 97-106.
- Price, S. (1967) Cytology of chinese and North Indian sugar canes. *Econ. Bot.* 22: 138-153.
- Price, S. *et al.* (1968) Cytology of south pacific sugar canes and related grasses, with special reference to Fidgi. *J. Hered.* 59: 141-145.

- Purseglove, J. W.(1988) Tropical crops. Monocotyledons. Wiley, New York. Vol.1;
pp 214-256 (sugar cane).
- Rothman, H. et al. (1983) Energy from alcohol: the brazilian experience. Kentucky Univ. Press, Kentucky. 375 p.
- Schery, R. W. (1984) Plants for man. Chapitre 6: 371-379.
- Simmonds, N. W. (1976) Evolution of crop plants. Longman, New York. pp 25-29; pp. 104-108.
- Simpson, B. B. & Ogorzaly, D. C. (1995) Economic Botany: Plants of our world. McGraw Hill Inc., New York, 2ème édition. pp. 271-277, 242, 657, 665.
- Stevenson, R. W. (1965) Genetics and breeding of sugar cane . Longman, Londres. 523 p.
- Tangle, L. (1986) Sugar cane : Cuba's noble crop. BioScience 36: 414-419.